

Міністерство освіти і науки України
Луцький національний технічний університет
(повне найменування вищого навчального закладу)

Факультет робототехніки та штучного інтелекту
(повне найменування факультету)

Кафедра робототехніки
(повна найменування кафедри)

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
ЗА СТУПЕНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ «БАКАЛАВР»
РОЗРОБКА КОНСТРУКЦІЇ ПІДВОДНОГО
АПАРАТУ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ АКВАТОРІЇ**

спеціальність 131 Прикладна механіка
(шифр і назва спеціальності)

освітня програма «Металообробне обладнання та роботизовані виробничі системи»
(назва освітньої програми)

Виконав: здобувач вищої освіти
групи ІМ(МОРВС)-42
СЕМЕНЮК Тарас Ігорович

(підпис)

Керівник: к.т.н., доцент
ВАЛЕЦЬКИЙ Богдан Петрович

(підпис)

Кваліфікаційну роботу
допущено до захисту
«__» _____ 2026 р.
к.т.н., доцент
Гарант освітньої програми:
ПРИДАЛЬНИЙ Борис Іванович

(підпис)

Луцьк - 2026 року

ЛУЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет транспорту та механічної інженерії

Кафедра прикладної механіки та мехатроніки

Перший (бакалаврський) рівень

Освітня програма: «Металообробне обладнання та роботизовані виробничі системи»

Спеціальність: 131 Прикладна механіка

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ПМіМ

_____ Р. РЕДЬКО

«__» _____ 2026 року

З А В Д А Н Н Я НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧУ ВИЩОЇ ОСВІТИ

СЕМЕНЮК Тарас Ігорович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. *Тема кваліфікаційної роботи бакалавра: «Розробка конструкції підводного апарату для дослідження акваторії», керівник роботи Валецький Богдан Петрович доцент, к.т.н. затверджені наказом ЛНТУ від 31 грудня 2025 року № 962/01–07.*
2. *Строк подання здобувачем вищої освіти кваліфікаційної роботи 01.06.2026 р*
3. *Вихідні дані до роботи: звіт з переддипломної практики, технічна документація, конструкторська документація, нормативні дані.*
4. *Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Вступ. 1. Огляд підводної робототехніки, 2. Конструктивно-технологічна частина. 3. Дослідницька частина. 4. Охорона праці. Загальні висновки. Список посилань. Додатки*
5. *Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)
Загальний вигляд підводного керованого апарату – 1 л, Загальний вигляд приводу апарата – 1 л.,*

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв

7. Дата видачі завдання

02.02.2026 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів кваліфікаційної роботи бакалавра	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	<i>Обґрунтування теми</i>	<i>06.12.2025</i>	
2.	<i>Огляд літератури із досліджуваної проблеми</i>	<i>13.02.2026</i>	
3.	<i>Огляд підводної робототехніки</i>	<i>20.02.2026</i>	
4.	<i>Конструктивно-технологічна частина</i>	<i>27.03.2026</i>	
5.	<i>Дослідницька частина</i>	<i>09.04.2026</i>	
6.	<i>Охорона праці</i>	<i>16.04.2026</i>	
7.	<i>Висновки та пропозиції</i>	<i>08.05.2026</i>	
8.	<i>Формування списку використаних джерел</i>	<i>08.05.2026 р.</i>	
9.	<i>Формування додатків</i>	<i>17.05.2026 р.</i>	
10.	<i>Оформлення ілюстративного матеріалу</i>	<i>17.05.2026 р.</i>	
11.	<i>Нормоконтроль</i>	<i>27.05.2026</i>	
12.	<i>Інструментальна перевірка на академічний плагіат</i>	<i>28.05.2026 р.</i>	
13.	<i>Представлення кваліфікаційної роботи бакалавра до захисту</i>	<i>31.05.2026 р.</i>	

Здобувач вищої освіти _____
(підпис)

Семенюк Т. І.
(прізвище та ініціали)

Керівник кваліфікаційної роботи _____
(підпис)

Валецький Б.П.
(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

СЕМЕНЮК Т. І. Розробка конструкції підводного апарату для дослідження акваторії. Рукопис.

Кваліфікаційна робота бакалавра ОП «Металообробне обладнання та роботизовані виробничі системи» спеціальності 131 Прикладна механіка. Луцький національний технічний університет. Луцьк, 2026.

У роботі розроблено телекерований безпілотний підводний апарат легкого класу для оглядових і дослідницьких завдань із глибиною занурення до 150 м і швидкістю руху 0,1–1 м/с. Високу маневреність забезпечують вісім рушійних модулів та система керування на основі пілотного джойстика, що дозволяє здійснювати багатовекторний рух у тривимірному просторі. Проведено аналіз сучасних аналогів, визначено їхні переваги й обмеження, що стало основою для прийняття конструктивних рішень.

Особливу увагу приділено ефективності та ергономіці системи керування. Спроектовано рушійний вузол, який виготовлюється методом 3D-друку; виконано розрахунок гребного гвинта (у SOLIDWORKS) та підбір електродвигуна з урахуванням гідродинамічних характеристик.

РОБОТОТЕХНІКА, МЕХАТРОНІКА, МОНІТОРИНГ, ПІДВОДНІ СПОРУДИ

					038.Б–26.00.00.00.000.ПЗ				
Зм	Арк	№ докум.	Підпис	Дата	Розробка конструкції підводного апарату для дослідження акваторії Пояснювальна записка	Літ.	Аркуш	Аркушів	
Розробив	Семенюк Т.І.					д	З		
Перевірив	Валецький Б.					ЛНТУ, ФРАІ, КАФ. РТ, гр. ІМ(МОРВС)–42			
Н.контр.	Валецький Б.								
Затв.	Придальний Б.								

ABSTRACT

SEMENYUK T. I. Development of the design of an underwater vehicle for researching the water area. Manuscript.

Qualification work for the bachelor's degree in "Metalworking equipment and robotic production systems", specialization 131 Applied Mechanics. Lutsk National Technical University. Lutsk, 2025.

The work developed a light-class remote-controlled unmanned underwater vehicle for survey and research tasks with a diving depth of up to 150 m and a speed of movement of 0.1–1 m/s. High manoeuvrability is provided by eight propulsion modules and a control system based on a pilot joystick, which allows for multi-vector movement in three-dimensional space. An analysis of modern analogues was conducted, their advantages and limitations were determined, which became the basis for making design decisions.

Special attention was paid to the efficiency and ergonomics of the control system. A propulsion unit was designed, which is manufactured using the 3D printing method; propeller calculation (in SOLIDWORKS) and electric motor selection taking into account hydrodynamic characteristics were performed.

ROBOTICS, MECHATRONICS, MONITORING, UNDERWATER
STRUCTURES

ЗМІСТ

ВСТУП	7
РОЗДІЛ 1 ОГЛЯД ПІДВОДНОЇ РОБОТОТЕХНІКИ.....	9
1.1 Аналіз підводних апаратів оглядового типу	9
1.2 Аналіз існуючих телекерованих безпілотних підводних апаратів	11
Висновки до розділу	19
РОЗДІЛ 2 КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА.....	21
2.1 Розробка структурної та функціональної схем.....	21
2.2 Конструкція апарата. Матеріали, що використовуються під час виготовлення.....	23
2.3 Розробка елементів конструкції апарата	27
2.4 Гребний гвинт підводного апарата	30
2.5 Плавучість підводного апарата та його стійкість	43
РОЗДІЛ 3 ДОСЛІДНИЦЬКА ЧАСТИНА.....	51
3.1 Керування безпілотним підводним апаратом оглядового класу. Кінематика руху	51
3.2 Динаміка руху. Виведення рівнянь руху підводного апарата.....	55
3.3 Математична модель керованого руху підводного апарату.....	59
3.4 Моделювання.....	65
РОЗДІЛ 4 ОХОРОНА ПРАЦІ	70
4.1 Аналіз виробництва, безпеки праці та навколишнього середовища	70
4.2 Мікроклімат	71
4.3 Освітлення.....	72
4.4 Електробезпека	75
4.5 Пожежна безпека.....	75
ВИСНОВКИ ТА ПРОПОЗИЦІЇ	77
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	79
ДОДАТКИ.....	81

ВСТУП

На сучасному етапі підводна робототехніка налічує понад сорок років активного розвитку. За цей період вона зазнала істотних змін не лише в апаратному забезпеченні, але й у методах організації робіт, підходах до керування, а також у сферах застосування підводних робототехнічних систем і комплексів. Розвиток морської робототехніки, зокрема військового та спеціального призначення, спрямований на підвищення ефективності виконання завдань і розширення функціональних можливостей, включаючи реалізацію складних підводно-технічних, інженерних та аварійно-рятувальних операцій для різних відомств і комерційних організацій.

Починаючи з початку 1950-х років, дистанційно керовані підводні апарати (remotely operated underwater vehicles – ROV), які спочатку переважно використовувалися у військовій сфері, пройшли стрімкий еволюційний шлях. Від масивних, важких і маломаневрених апаратів робочого класу, що застосовувалися переважно під час масштабного підводного будівництва, вони трансформувалися у компактні, енергоефективні та високотехнологічні системи, представлені сьогодні на світовому ринку підводної техніки.

Нині в галузі прийнято виділяти чотири основні класи телекерованих безпілотних підводних апаратів, які розрізняються за функціональним призначенням, потужністю, масо-габаритними параметрами та складністю конструкції. До таких класів належать:

- малогабаритні ТБПА;
- ТБПА легкого класу;
- робочі ТБПА легкого класу;
- робочі ТБПА важкого класу.

Для розуміння відмінностей між вказаними групами доцільно розглянути кожен клас окремо. Малогабаритні ТБПА характеризуються компактними розмірами та малою масою, що дозволяє транспортувати їх навіть у легкових автомобілях. Такі апарати зазвичай виконують завдання з візуального огляду та обстеження підводних об'єктів як у відкритих акваторіях, так і в обмежених

					038.Б-26.00.00.00.000.ПЗ	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

просторах, зокрема всередині трубопроводів, підводних колекторів або затонулих суден. Їх експлуатація, як правило, не потребує великої команди, і для керування достатньо одного оператора.

ТБПА легкого класу відрізняються від малогабаритних апаратів більшою потужністю рушійних систем та збільшеними габаритами. Вони призначені для повноцінних підводних досліджень і здатні нести на собі різноманітне додаткове обладнання. До такого обладнання належать потужні освітлювальні прилади, додаткові відеокамери, маніпулятори, гідролокатори, маяки систем гідроакустичної навігації та інші спеціалізовані модулі. Окрім цього, апарати даного класу можуть виконувати операції з підйому об'єктів незначної маси.

Наступною групою є робочі ТБПА легкого класу – відносно компактні, але достатньо потужні апарати, оснащені маніпуляторними системами та інструментальними комплексами. Вони призначені не лише для оглядових і пошукових операцій, а й для виконання безпосередніх підводних робіт. Такі апарати застосовуються під час обслуговування платформ, трубопроводів, елементів підводної інфраструктури, а також у процесах підтримки бурових робіт, легкого підводного будівництва та технічної діагностики.

Робочі ТБПА важкого класу використовуються для виконання найбільш складних завдань, що здійснюються на великих глибинах, у зонах сильних течій або за необхідності транспортування значних вантажів. Дані комплекси мають суттєві масо-габаритні показники та значно перевершують за потужністю й вантажопідйомністю всі інші класи підводних робототехнічних апаратів.

У межах даної роботи було спроектовано телекерований безпілотний підводний апарат легкого класу, призначений для експлуатації на глибинах до 200 метрів. Обраний клас апарата забезпечує оптимальний баланс між функціональністю, мобільністю, складністю конструкції та економічною доцільністю, що відповідає поставленій меті проекту.

					038.Б-26.00.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		8

РОЗДІЛ 1

ОГЛЯД ПІДВОДНОЇ РОБОТОТЕХНІКИ

1.1 Аналіз підводних апаратів оглядового типу

На сучасному етапі розвитку підводної робототехніки представлено широкий спектр телекерованих безпілотних підводних апаратів (ТБПА, або remotely operated underwater vehicles – ROV), які суттєво відрізняються між собою як за технічними характеристиками, так і за рівнем складності, вартістю та областями застосування. Існуючі зразки охоплюють як прості апарати для візуального огляду, так і високотехнологічні комплекси, призначені для наукових досліджень, інженерних і пошукових робіт.

У рамках даної роботи передбачається створення власного роботизованого підводного апарата, який концептуально відрізнятиметься від серійних моделей та поєднуватиме найефективніші технічні рішення, реалізовані в сучасних аналогах. Основним призначенням розроблюваної системи є проведення обстежень різноманітних підводних об'єктів, у тому числі природного та штучного походження, в умовах обмеженої видимості та підвищеної складності навігації.

Для формування функціональної структури апарата було розроблено технічне завдання, яке визначає ключові вимоги до апаратного та програмного забезпечення комплексу. Основні положення технічного завдання полягають у такому:

1. Електронна платформа та керування. Робототехнічний комплекс повинен базуватися на стандартному контролері з модульною архітектурою електроніки. Усі складові мають бути уніфікованими, легко замінними та доступними для придбання. Програмне забезпечення керування повинно мати відкриту архітектуру, що дозволяє його модифікацію, адаптацію під конкретні завдання, а також використання в освітньому процесі.

2. Рухомість і маневреність апарата. Кількість та конфігурація рушійних двигунів визначаються вимогами до мобільності апарата. Передбачається

					038.Б-26.00.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		9

можливість реалізації схем руху від чотирьох ступенів вільності (лінійне переміщення у трьох напрямках і обертання навколо однієї осі) до повної шестиосьової кінематики, що забезпечує переміщення та обертання в усіх просторових координатах.

3. Світлотехнічне оснащення. Конструкція апарата повинна передбачати наявність освітлювальних приладів у передній та задній частинах із плавним регулюванням яскравості. Освітлення має забезпечувати режими ближнього та дальнього підсвічування для ефективної роботи в різних умовах прозорості води.

4. Відеоспостереження. Для забезпечення візуального контролю передбачено встановлення цифрових відеокамер у носовій та кормовій частинах апарата з можливістю передачі зображення в режимі реального часу.

5. Навігаційне забезпечення. Система орієнтації та навігації повинна включати:

- електронний компас для визначення просторового положення;
- гідроакустичний сонар, призначений для пошуку та виявлення об'єктів у складних умовах видимості;
- систему підводного позиціонування з прив'язкою до географічних координат із використанням короткобазової схеми.

6. Автоматичні режими керування. Має бути забезпечена підтримка автономних функцій, таких як автоматичне утримання курсу, стабілізація заданої глибини та фіксація апарата в просторі відносно заданої точки.

7. Моніторинг параметрів навколишнього середовища. Конструкція комплексу повинна дозволити підключення сертифікованих сенсорів екологічного контролю, зокрема:

- датчика температури з можливістю вимірювання параметрів придонного шару ґрунту з проникненням до 20 см;
- пристрою для відбору та аналізу газів;
- рН-метра для оцінки кислотно-лужного стану води;
- сенсорів для визначення солоності водного середовища.

					038.Б-26.00.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		10

8. Телеметричні дані. У процесі роботи апарат повинен забезпечувати передачу оператору комплексу телеметричної інформації, яка включає:

- поточні дату та час;
- значення глибини занурення;
- показники компаса та напрям руху;
- температуру навколишнього середовища;
- потужність і режими роботи рушійних установок.

У подальших розділах роботи планується розгляд конструктивних і технологічних рішень, а також аналіз методів реалізації функціональних можливостей, визначених у технічному завданні, з метою створення ефективного та надійного підводного робототехнічного комплексу.

1.2 Аналіз існуючих телекерованих безпілотних підводних апаратів

1.2.1 Підводний апарат BlueROV2 Heavy Configuration Retrofit Kit

Станом на сьогодні, за інформацією виробника, одним із найбільш доступних за вартістю та водночас високопродуктивних телекерованих безпілотних підводних апаратів (ROV – remotely operated underwater vehicle) є модель BlueROV2. Даний апарат широко застосовується як у науково-дослідницькій, так і в інженерній та освітній сферах завдяки своїй універсальності та відкритій архітектурі.

Базова конфігурація апарата оснащується шістьма електричними рушійними двигунами, що реалізують векторну схему керування. Такий підхід дозволяє забезпечити стабільність платформи та плавні маневри у водному середовищі. Важливою перевагою BlueROV2 є те, що вся електронна частина, а також програмне забезпечення з вихідними кодами перебувають у відкритому доступі, що значно розширює можливості модифікації апарата та його адаптації під спеціалізовані завдання. Загальний вигляд стандартної конфігурації пристрою наведено на рис. 1.1.

Апарат постачається у розібраному вигляді, а процес його складання зазвичай займає від 6 до 12 годин. Такий формат постачання має не лише

					038.Б-26.00.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11

логістичні, а й навчальні переваги, оскільки дозволяє користувачеві детально ознайомитися з внутрішньою будовою апарата, принципами з'єднання окремих вузлів та взаємодією електронних і механічних компонентів. У подальшому це значно спрощує модернізацію пристрою та проведення ремонтних робіт.



Рисунок 1.1 – Стандартна конфігурація підводного апарата BlueROV2

Стандартний варіант BlueROV2 підтримує встановлення до чотирьох освітлювальних модулів, кожен з яких забезпечує світловий потік до 6000 люмен. Такий рівень освітлення забезпечує достатню видимість на значних глибинах та в умовах слабкої прозорості води. Векторна система керування сприяє збереженню курсової стійкості апарата та дозволяє виконувати точні маневри, що зменшує навантаження на оператора й підвищує якість відеозйомки.

Окрему увагу слід приділити можливостям апарата щодо встановлення додаткових навісних модулів. Зокрема, можлива комплектація подовженим кабелем зв'язку довжиною до 300 метрів. Використання більшої довжини кабелю в більшості випадків недоцільне, оскільки навіть за незначних течій кабель з поперечним перерізом понад 8 мм зазнає значного зносу та зноситься потоком. З урахуванням тягових характеристик двигунів можна стверджувати, що максимальна довжина кабелю ефективно реалізується переважно в замкнених або малорухомих водоймах, таких як озера чи водосховища.

Крім того, апарат може бути оснащений сканером – гідролокатором, який забезпечує ефективну навігацію та пошук об'єктів в умовах низької видимості.

					038.Б-26.00.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

Система супутникової навігації GPS у поєднанні з підводним модулем позиціонування дозволяє визначати координати апарата та відображати його місцезнаходження на карті в реальному часі.

Особливої уваги заслуговує розширена конфігурація BlueROV2 Heavy Configuration Retrofit Kit. У цьому варіанті апарат додатково оснащується двома рушійними двигунами та двома поплавками, що істотно змінює його кінематичні можливості та зовнішній вигляд. Як показано на рис. 1.2, після модернізації двигуни, відповідальні за вертикальний рух, розташовуються симетрично з боків конструкції.



Рисунок 1.2 – Підводний апарат BlueROV2 у конфігурації Heavy Configuration Retrofit Kit

Запропоноване розташування рушіїв забезпечує повноцінне керування апаратом у шести ступенях вільності, що значно підвищує його маневреність. Це дозволяє виконувати складні просторові рухи, зокрема ті, що часто демонструються під час змагань з підводної робототехніки серед телекерованих апаратів. Саме така схема розміщення двигунів розглядається як перспективна для використання в подальшій розробці власного підводного робототехнічного комплексу.

					038.Б-26.00.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13

1.2.2 Підводний телекерований апарат «GNOM»

Одним із відомих виробників у галузі підводної робототехніки є компанія, що спеціалізується на розробленні телекерованих безпілотних підводних апаратів, а також допоміжного обладнання й аксесуарів до них. Для порівняльного аналізу було обрано модель «GNOM», зображену на рис. 1.3, оскільки серед апаратів даного класу вона вирізняється підвищеним рівнем маневреності.

Конструкція апарата передбачає використання шести рушійних електродвигунів: чотирьох горизонтально орієнтованих, які забезпечують рух уперед і назад та стабілізацію курсу, а також двох вертикально розташованих двигунів, призначених для виконання операцій занурення і спливання. Така силова схема дозволяє ефективно керувати апаратом у більшості стандартних робочих режимів.



Рисунок 1.3 – Телекерований підводний апарат «GNOM»

Для візуального контролю підводного середовища апарат обладнаний двома відеокамерами, встановленими у носовій і кормовій частинах корпусу. Це забезпечує огляд робочої зони як у напрямку руху, так і під час маневрування або відходу від об'єкта. «GNOM» характеризується високою швидкістю пересування та доброю керованістю, що є важливою перевагою під час виконання оглядових і пошукових операцій.

					038.Б-26.00.00.00.000.ПЗ	Арк.
						14
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Разом із тим, у порівнянні з апаратом BlueROV2 у конфігурації Heavy Configuration, дана модель має обмежені кінематичні можливості. Зокрема, менша кількість ступенів вільності не дозволяє реалізувати повноцінне шестиосьове керування, що знижує гнучкість під час складних просторових маневрів.

Попри це, підводні апарати даного типу широко застосовуються в багатьох практичних сферах. Вони ефективно використовуються під час пошуково-рятувальних операцій, для виявлення та обстеження затонулих об'єктів, а також при дослідженні різноманітних підводних стаціонарних споруд. Окрім того, такі робототехнічні комплекси залучаються до виконання оглядових і ремонтних робіт, зокрема під час інспекції корпусів суден, що дозволяє суттєво скоротити часові та фінансові витрати в порівнянні з використанням водолазних робіт.

Також апарат «GNOM» може застосовуватися для обстеження об'єктів державного та регіонального значення. Прикладами таких об'єктів є атомні електростанції, нафтовидобувні платформи, гідроелектростанції, дамби та водосховища, де використання традиційних методів контролю є ускладненим або небезпечним для персоналу.

Конструкція апарата передбачає можливість встановлення додаткового навісного обладнання, серед якого маніпуляторні системи, гідролокатори, панорамні камери та інші модулі, що істотно розширюють функціональні можливості комплексу. Це робить апарат універсальним інструментом для вирішення широкого спектра завдань.

Серед основних недоліків системи варто відзначити відсутність ще двох вертикально орієнтованих рушійних двигунів, які могли б забезпечити додаткові ступені свободи та підвищити маневреність у вертикальній площині. Крім того, апарат не має автономного джерела живлення, що обмежує його застосування. Для коректної роботи пульта керування та всієї системи загалом необхідне підключення до зовнішнього джерела електроживлення напругою 220 В, що зменшує мобільність комплексу в польових умовах.

					038.Б-26.00.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		15

1.2.3 Підводний телекерований апарат Boxfish ROV

Наступним зразком для порівняльного аналізу є Boxfish ROV – телекерований необитаємий підводний апарат, зображений на рис. 1.4, який вирізняється відносно простою, але водночас ефективною конструктивною схемою. Основою апарата є центральна герметична колба, у якій розміщені всі електронні компоненти керування та акумуляторні батареї. Навколо цієї колби змонтовано вісім рушійних електродвигунів, закріплених безпосередньо до корпусу та силової рами конструкції.



Рисунок 1.4 – Телекерований підводний апарат Boxfish ROV

Згідно з технічними характеристиками, апарат призначений для роботи на глибинах до 300 метрів, що є одним із найкращих показників серед розглянутих аналогів. Окремо виробник заявляє можливість стабільної та якісної передачі даних при використанні кабелю зв'язку довжиною до 1000 метрів, що є доволі показовим параметром і заслуговує на особливу увагу. Подібні технічні рішення доцільно врахувати під час подальшої розробки власного підводного робототехнічного апарата.

Конструкція Boxfish ROV справляє враження підвищеної надійності, оскільки в ній відсутні окремі з'єднані між собою капсули або додаткові гермовводи. Це значно зменшує кількість потенційно небезпечних місць проникнення води та підвищує загальну герметичність системи. Завдяки такому

					038.Б-26.00.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16

підходу апарат зберігає працездатність навіть у випадку часткового забруднення або зниження ефективності окремих рушійних двигунів.

Важливою функціональною особливістю є наявність аварійного режиму спливання. У разі втрати зв'язку з оператором або пошкодження кабелю система автоматично переходить до автономного живлення та забезпечує підйом апарата на поверхню із збереженням інформації про його місцезнаходження. Така функція істотно підвищує експлуатаційну безпеку та знижує ризик повної втрати апарата під час виконання робіт на значних глибинах.

Ще однією відмінною рисою Boxfish ROV є використання панорамної відеосистеми з роздільною здатністю 4K. Камера складається з двох ультраширококутних навігаційних модулів, які формують об'ємне зображення та забезпечують високий рівень ситуаційної обізнаності оператора. Додатково в апараті реалізовані алгоритми стабілізації положення та зображення, що позитивно впливає на якість відео- та фотозйомки.

З урахуванням своїх конструктивних і функціональних особливостей, даний робототехнічний комплекс переважно використовується для виконання високоякісної відео- та фотозйомки підводного середовища, зокрема під час інспекцій, наукових досліджень та візуального документування об'єктів. При цьому Boxfish ROV демонструє приклад орієнтації на надійність, автономність і якість зображення, навіть за умови відносно простої силової схеми.

1.2.4 Підводний робототехнічний комплекс DEEP TREKKER ROBOTICS

Робототехнічний підводний апарат компанії Deep Trekker Robotics одразу привертає увагу своїм впізнаванним і продуманим дизайном, що вигідно вирізняє його серед інших представників даного класу. Ергономічна форма корпусу та сучасний зовнішній вигляд сприяють не лише естетичній привабливості, а й покращенню гідродинамічних характеристик апарата.

Конструктивно апарат оснащений шістьма рушійними двигунами, з яких чотири розташовані горизонтально та відповідають за рух у поздовжньому і

					038.Б-26.00.00.00.000.ПЗ	Арк.
						17
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

поперечному напрямках, а два вертикальні – за занурення та спливання. Окрім цього, в конструкції передбачено дві окремі герметичні капсули з потужними освітлювальними приладами, які забезпечують ефективне підсвічування робочої зони навіть на значних глибинах.

Для візуального спостереження використовується відеокамера зі значним вертикальним кутом огляду від -110° до $+150^{\circ}$, що в сукупності становить 260° оглядового простору. Така оптична система дозволяє здійснювати фото- та відеозйомку не лише об'єктів, розташованих на дні, а й елементів, що знаходяться вище рівня апарата, що істотно розширює можливості його застосування. Габаритні розміри пристрою становлять: ширина – 440 мм, висота – 235 мм, довжина – 717 мм, що забезпечує оптимальний баланс між компактністю та стійкістю.

За заявами розробників, апарат розрахований на роботу на глибинах до 305 метрів, що є одним із найвищих показників серед розглянутих аналізованих аналогів. Досягнення такої глибини занурення визначається як важливий орієнтир, до якого доцільно прагнути при проектуванні власного підводного апарата. У даній моделі також реалізовано векторну систему керування, що забезпечує високу точність маневрування та стабільність у тривимірному просторі, що додатково підтверджує доцільність впровадження подібного принципу в перспективній розробці.

На рис. 1.5 наведено загальний вигляд апарата DEEP TREKKER ROBOTICS. По обидва боки корпусу розміщені поплавки, які сприяють зменшенню лобового опору, покращують обтічність і забезпечують додаткову стабілізацію під час руху. Система керування апаратом реалізована за допомогою пульта, конструктивно подібного до контролерів, що використовуються для керування квадрокоптерами, що робить інтерфейс зручним та інтуїтивно зрозумілим для оператора.

Робототехнічний комплекс підтримує встановлення різноманітного додаткового обладнання, виробленого тією ж компанією, що дозволяє адаптувати апарат під конкретні завдання. До таких модулів можуть належати

					038.Б-26.00.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		18

додаткові сенсори, навігаційні системи та інші допоміжні пристрої, які розширюють функціональні можливості комплексу.



Рисунок 1.5 – Телекерований підводний апарат DEEP TREKKER ROBOTICS

Основним недоліком даного апарата є його висока вартість, яка становить близько 38 тис доларів США. Така ціна обґрунтовується виробником значною максимальною глибиною занурення, можливістю безперервної роботи під водою до 8 годин, використанням відеокамери з роздільною здатністю 4К, наявністю комплексу датчиків для зручного та точного керування, а також здатністю апарата виконувати складні просторові маневри з високим рівнем стабілізації.

Висновки до розділу

У процесі розгляду та порівняльного аналізу найбільш показових і технічно близьких за призначенням робототехнічних підводних систем було детально досліджено їхні конструктивні та функціональні особливості. На основі проведеного аналізу визначено ключові переваги та недоліки кожного з розглянутих комплексів, що дозволило сформулювати об'єктивне уявлення про сучасний рівень розвитку телекерованих безпілотних підводних апаратів.

Отримані результати будуть використані під час проектування власного підводного робототехнічного комплексу. При цьому особливу увагу буде приділено усуненню виявлених недоліків аналогічних систем, а також

					038.Б-26.00.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		19

впровадженню вдосконалених конструктивних рішень, більш надійних вузлів і сучасних функціональних модулів.

Одним із пріоритетних напрямів подальшої розробки є забезпечення значної дальності та стабільності каналу зв'язку між підводним апаратом і наземною станцією керування. Підвищення ефективності системи обміну даними може стати суттєвою конкурентною перевагою, особливо під час виконання робіт на великих глибинах або в умовах обмеженого доступу.

Не менш важливою складовою є система керування апаратом, яка повинна поєднувати високу точність і чутливість із простотою та зручністю використання для оператора. У межах проєкту передбачається реалізація керування за допомогою пілотного джойстика, який широко застосовується в авіаційних симуляторах. Такий підхід дозволить підвищити ергономічність процесу керування, а також провести оцінку переваг і можливих обмежень даного способу управління підводним робототехнічним апаратом.

Таким чином, проведений аналіз аналогів сформував основу для подальшої розробки ефективного, конкурентоспроможного та зручного в експлуатації підводного робототехнічного комплексу, який відповідатиме сучасним вимогам до функціональності, надійності та керованості.

					038.Б-26.00.00.00.000.ПЗ	Арк.
						20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 2

КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА

2.1 Розробка структурної та функціональної схем

Для повного розуміння архітектури підводного робототехнічного апарата та принципів його функціонування необхідно сформувати структурну схему програмно-апаратного комплексу. Така схема повинна відображати основні функціональні блоки виробу, а також взаємозв'язки між ними. Структурну схему розглядають у узагальненому вигляді без деталізації окремих вузлів.

У процесі аналізу існуючих аналогів було встановлено, що перспективний апарат повинен мати високу маневреність і здатність ефективно переміщатися в будь-якому напрямку у водному просторі. У зв'язку з цим доцільним є застосування не шести рушіїв, як у більшості серійних моделей, а восьми електродвигунів. Подібна схема розташування рушійних установок була реалізована, зокрема, в апараті BlueROV2 Heavy Configuration, що підтвердило її ефективність.

Конструкція апарата має бути модульною, з уніфікованими та взаємозамінними елементами, що забезпечить можливість технічного обслуговування та подальшої модернізації без значних конструктивних змін. З огляду на це концепція цілісного корпусу з інтегрованими модулями, характерна для Voxfish ROV, у даному проекті не розглядається як оптимальна.

На борту апарата повинні розміщуватися ключові електронні компоненти керування та обробки сигналів, тоді як акумуляторну батарею з міркувань безпеки та зручності експлуатації доцільно винести в окремий герметичний відсік. Окрім цього, конструкція має передбачати наявність базового комплексу датчиків, відеокамери та кількох освітлювальних приладів, необхідних для виконання підводних досліджень і спостережень.

Виходячи з наведених вимог, структурна схема програмно-апаратного комплексу набуває вигляду, поданого на рисунку 6. Як видно із схеми, система складається з двох основних частин:

					038.Б-26.00.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		21

- наземної частини базування, з якої здійснюється керування апаратом та приймання відеосигналу;
- підводної частини, до складу якої безпосередньо входить робототехнічний апарат з усіма бортовими системами.

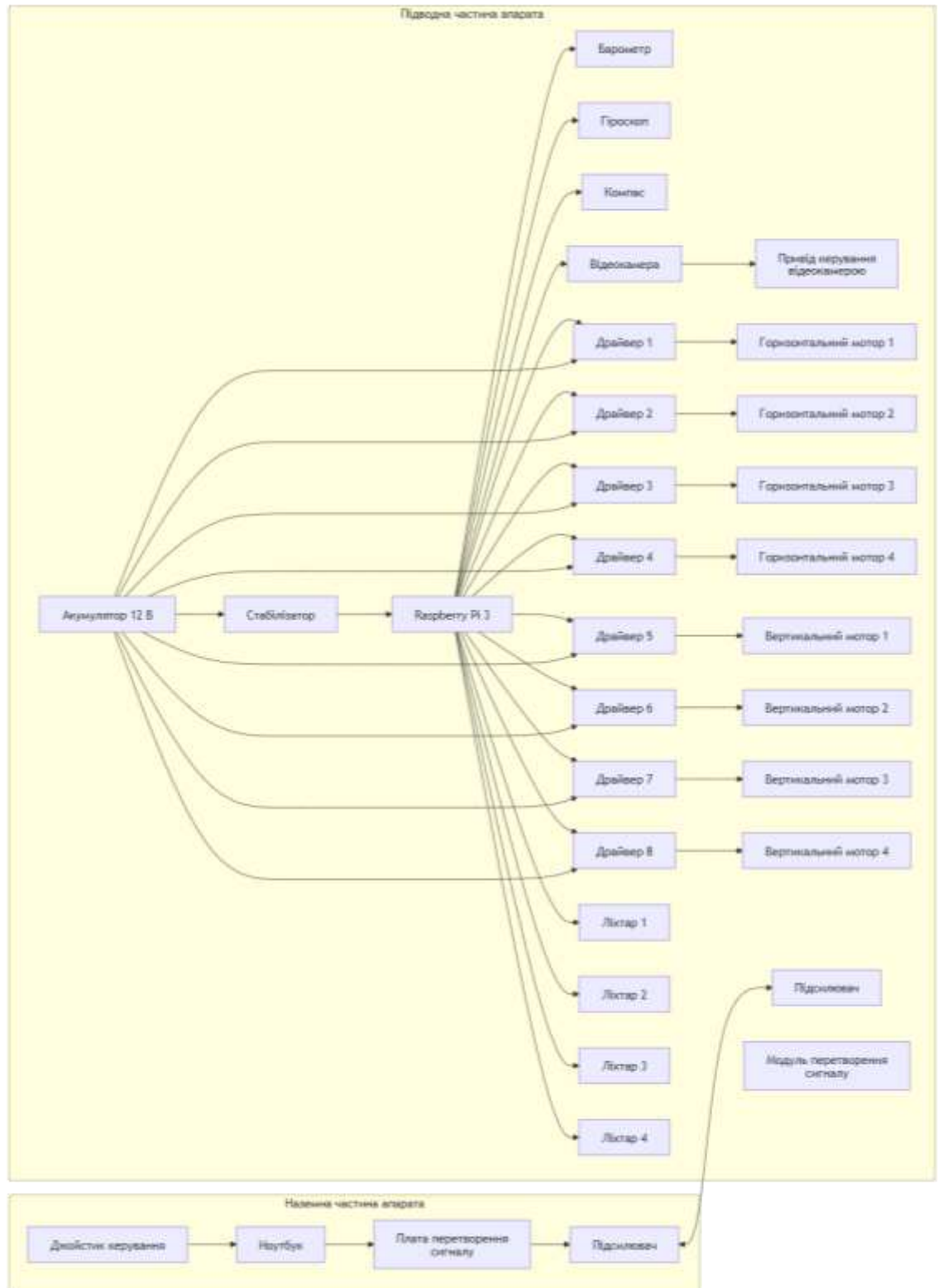


Рисунок 2.1 – Структурна схема програмно-апаратного комплексу

Обмін даними між підводним апаратом і наземною станцією керування здійснюється за допомогою кабелю з нульовою плавучістю, довжина якого може змінюватися в межах від 50 до 300 метрів залежно від умов експлуатації.

Для забезпечення стабільного керування та отримання якісного відеосигналу на значних відстанях необхідно застосувати перетворювач (конвертор) відеосигналу, здатний передавати інформацію без істотних втрат якості на відстань до 300 метрів.

З цієї метою було обрано відеорозподільник SC&T VD102 (VE02), який повністю відповідає поставленим технічним вимогам. Даний модуль забезпечує передавання відеосигналу на дистанцію до 300 м, працює від напруги живлення 5 В, має низьке енергоспоживання (приблизно 150 мА) та підтримує передавання зображення з роздільною здатністю до 1600×1200 пікселів.



Рисунок 2.2 – Конвертер відеосигналу SC&T VD102 (VE02)

Таким чином, у подальшій реалізації проєкту вказаний модуль буде підключений з одного боку до відеокамери підводного апарата, а з іншого – до ноутбука або монітора оператора. Це забезпечить стабільну передачу відеоданих у режимі реального часу з достатньо високою якістю зображення, що є критично важливим для ефективного керування та виконання поставлених завдань.

2.2 Конструкція апарата. Матеріали, що використовуються під час виготовлення

Конструкція підводного робототехнічного апарата повинна відповідати підвищеним вимогам до надійності та міцності, оскільки в процесі експлуатації

					038.Б-26.00.00.00.000.ПЗ	Арк.
						23
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

вона зазнає значних механічних і гідростатичних навантажень. Матеріали, що застосовуються в складі робототехнічного комплексу, мають поєднувати в собі невелику масу, достатню жорсткість, стійкість до впливу водного середовища, а також бути доступними з точки зору вартості та постачання.

Цим вимогам у найбільшій мірі відповідають деякі органічні та неорганічні полімерні матеріали, зокрема поліпропілен, поліетилен, ударостійкий полістирол та капролон. Кожен із перелічених полімерів характеризується власним набором фізико-механічних, термічних і хімічних властивостей, що потребує детального аналізу з метою вибору оптимального варіанта для використання як основи корпусу апарата.

Основні технічні характеристики досліджуваних матеріалів, а також їх орієнтовна вартість за лист стандартного формату 1500 × 3000 мм, наведені в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Основні характеристики полімерних матеріалів

Матеріал	Густина	Температурний діапазон	Модуль пружності	Межа міцності при розтягуванні
Ударостійкий полістирол	1,05 г/см ³	–75 ... +105 °С	2850–2930 МПа	45–50 МПа
Поліетилен	0,91–0,95 г/см ³	–70 ... +80 °С	700–1200 МПа	35–45 МПа
Поліпропілен	0,90–0,92 г/см ³	–20 ... +80 °С	1200–1600 МПа	41–47 МПа
Капролон	1,15–1,16 г/см ³	–40 ... +70 °С	2000–3000 МПа	42–50 МПа

Після детального вивчення кожного матеріалу було виділено ключові чинники, які мали вирішальне значення під час вибору основи для корпусу апарата.

Ударостійкий полістирол (рис. 2.3) є матеріалом із покращеними міцнісними характеристиками порівняно зі звичайним полістиролом. У побуті він широко застосовується для виготовлення пластикових контейнерів і пакування, проте його ударостійка модифікація має збільшену товщину та вищу

					038.Б–26.00.00.00.000.ПЗ	Арк.
						24
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

механічну витривалість. Незважаючи на майже нейтральну плавучість і достатній рівень міцності, аналіз пропозицій перевірених постачальників показав, що даний матеріал має високу початкову вартість. З урахуванням додаткових витрат на доставку його застосування в даному проекті є економічно недоцільним.

Листовий поліетилен за своїми фізико-хімічними властивостями є близьким до поліпропілену, однак має певні відмінності, що впливають на доцільність його використання. До переваг матеріалу належить підвищена пластичність, проте його допустимий рівень робочого тиску становить близько 16 МПа, тоді як у поліпропілену цей показник сягає 20 МПа. Хоча вартість поліетилену разом із доставкою є нижчою порівняно з ударостійким полістиролом, вона все ж не відповідає критерію оптимального співвідношення ціни та механічних властивостей.

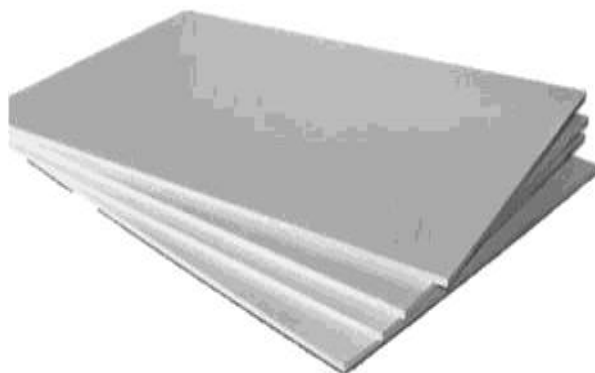


Рисунок 2.3 – Лист ударостійкого полістиролу

Поліпропілен (рис. 3.4), у свою чергу, характеризується вищою міцністю та жорсткістю в порівнянні з поліетиленом, а також здатністю витримувати більші навантаження. За хімічною стійкістю він практично не поступається поліетилену, залишаючись інертним до впливу води та більшості агресивних середовищ. Важливою перевагою є і його доступність: матеріал наявний у продажу в межах міста Астрахань, що дозволяє без зайвих логістичних витрат здійснити закупівлю та оперативно розпочати механічну обробку.

					038.Б-26.00.00.00.000.ПЗ	Арк.
						25
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

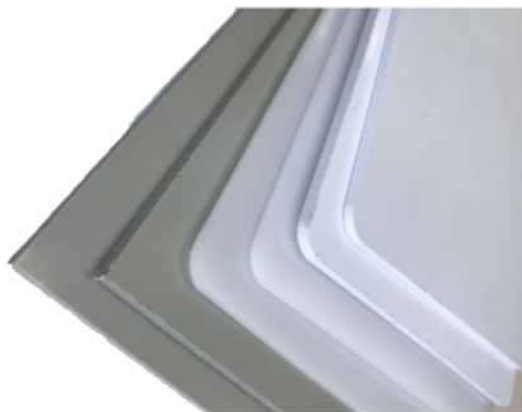


Рисунок 2.4 – Листи поліпропілену та поліетилену

Наступним розглянутим матеріалом є капролон (рис. 2.5), який упродовж кількох десятиліть успішно використовується як заміна сталевих деталей у машинобудуванні. Він має високі міцнісні та зносостійкі характеристики, а його головною перевагою є низький коефіцієнт тертя. Завдяки цьому капролон широко застосовується для виготовлення підшипників ковзання, зубчастих коліс та інших обертових елементів механізмів. Проте для використання в якості корпусного матеріалу він має суттєві недоліки: більшість постачальників реалізують його у вигляді гранул, оскільки основним методом виготовлення деталей є лиття. Листові заготовки або відсутні, або мають розміри, які не відповідають габаритам проєктованого апарата, що істотно обмежує свободу конструювання.



Рисунок 2.5 – Листовий капролон

Таким чином, за результатами всебічного аналізу експлуатаційних, технологічних і економічних показників найбільш раціональним вибором як матеріалу для виготовлення корпусу підводного робототехнічного апарата є

					038.Б-26.00.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		26

поліпропілен, який забезпечує оптимальний баланс між міцністю, масою, хімічною стійкістю, доступністю та вартістю.

2.3 Розробка елементів конструкції апарата

Конструктивною основою підводного апарата обрано алюмінієві герметичні колби (рис. 2.6) із зовнішнім діаметром 110 мм та довжиною 250 мм. Згідно з технічною документацією виробника, така колба розрахована на експлуатацію на глибинах до 300 метрів, що відповідає вимогам, сформованим на етапі аналізу аналогів.

У стінках кожної колби з обох боків виконано по шість різьбових отворів, що дає змогу надійно закріпити ущільнювальні елементи конструкції. У свою чергу, ці елементи забезпечують фіксацію прозорої захисної лінзи, необхідної для встановлення відеокамери та збереження герметичності внутрішнього об'єму.



Рисунок 2.6 – Алюмінієва труба, що використовується в конструкції

У середині колб передбачається розміщення всієї бортової електроніки та елементів живлення. З метою підвищення надійності та зручності компонування було прийнято рішення використовувати дві окремі колби. Такий підхід дозволяє логічно розділити функціональні вузли та мінімізувати ризики у випадку пошкодження одного з відсіків.

					038.Б-26.00.00.00.000.ПЗ	Арк.
						27
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

У першій колбі планується розміщення основних електронних компонентів, зокрема відеокамери, мікроконтролера, драйверів керування рушійними двигунами, стабілізаторів напруги та частини датчиків. Друга колба призначається для акумуляторного блоку, який передбачається зібрати самостійно на базі окремих літій-іонних елементів. На подальших етапах проєктування буде виконано розрахунок необхідної ємності та робочої напруги акумуляторної батареї з урахуванням енергоспоживання всіх систем апарата.

Каркас і несучі елементи підводного апарата планується виготовляти з поліпропілену, а допоміжні деталі – за допомогою 3D-друку з PLA-пластику. Раніше обраний поліпропілен товщиною 8 мм повинен забезпечити достатню жорсткість і міцність конструкції, щоб витримувати експлуатаційні навантаження, зокрема можливі ударні впливи під час випадкових зіткнень або падінь.

З метою підтвердження коректності вибору матеріалу було виконано розрахунок міцності з використанням програмного середовища Solid Works.

Після задання властивостей матеріалу проведено чисельний розрахунок навантаження для окремого елемента конструкції. Результати моделювання показали, що за прикладеного навантаження 100 Н до крайових зон деталі руйнування не відбувається. Максимальне значення прогину становить 21,3 мм, що є допустимим і не призводить до втрати цілісності конструкції.

Отримані результати чисельного аналізу деформацій і напружень наведені на рис. 2.7 – 2.9 та підтверджують достатній запас міцності обраної геометрії та матеріалу.

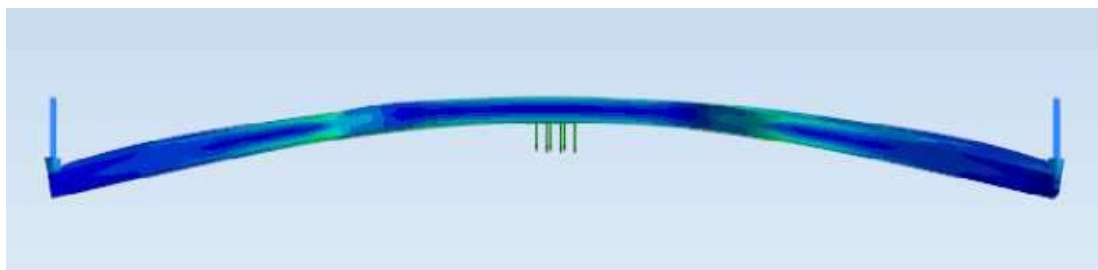


Рисунок 2.7 – Згин елемента конструкції під дією навантаження

					038.Б-26.00.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		28

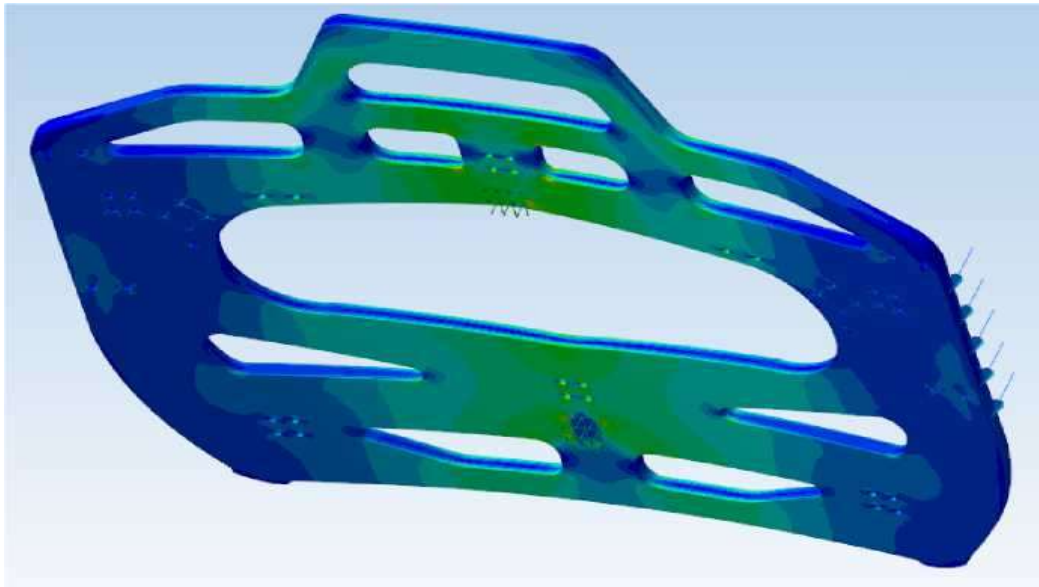


Рисунок 2.8 – Деформація елемента конструкції під дією навантаження

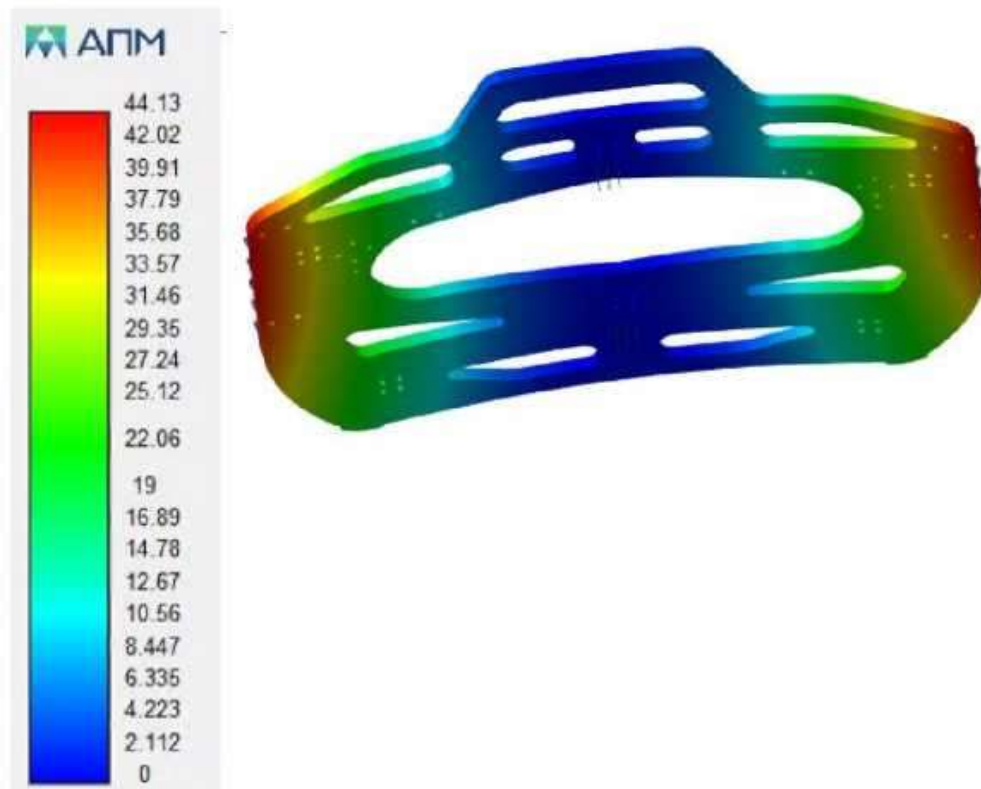


Рисунок 2.9 – Карта розподілу напружень

На підставі проведених розрахунків можна зробити висновок, що розроблена конструкція підводного апарата здатна витримувати прямі механічні контакти з різноманітними підводними об'єктами без порушення герметичності корпусу та без критичних пошкоджень несучих елементів. Це підтверджує доцільність обраних матеріалів і конструктивних рішень для подальшої реалізації проєкту.

					038.Б-26.00.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		29

2.4 Гребний гвинт підводного апарата

Одним з ключових елементів підводного апарата є гребний гвинт, оскільки саме він безпосередньо забезпечує формування рушійної сили та визначає ефективність використання потужності двигуна. Для коректного проектування й подальшого розрахунку гребного гвинта необхідно проаналізувати його основні геометричні та гідродинамічні параметри.

Серед найважливіших характеристик гребного гвинта виділяють діаметр і крок, оскільки саме вони істотно впливають на тягові властивості, коефіцієнт корисної дії рушійної установки та ступінь реалізації потужності електродвигуна. Від правильного підбору цих параметрів залежить загальна ефективність руху підводного апарата.

Під час руху корпус апарата взаємодіє з водним середовищем, залучаючи за собою маси води та формуючи так званий попутний потік. Унаслідок цього швидкість натікання води на гребний гвинт V_a є більшою за фактичну швидкість руху апарата V . Для швидкісних суден із глісерним режимом руху різниця між цими швидкостями становить приблизно 2 – 8 %, тоді як для малошвидкісних і важких апаратів вона може досягати 15 – 20 %.

Форма корпусу спеціально проектується таким чином, щоб створювати попутний потік і зменшувати швидкість води, яка безпосередньо надходить до гвинта. Цей ефект описується коефіцієнтом гребного потоку w .

Швидкість натікання води на гребний гвинт визначається за формулою:

$$V_a = V \cdot (1 - w) \quad (2.1)$$

де V – швидкість руху апарата,

w – коефіцієнт попутного потоку.

Важливою характеристикою роботи гребного гвинта є ковзання, яке описує роботу лопатей під певним кутом атаки α відносно потоку води. Відношення ковзання до теоретичної швидкості гвинта, виражене у відсотках, називають відносним ковзанням. Воно визначається за формулою:

$$S = 1 - H \cdot \frac{n}{V_a} \quad (2.2)$$

					038.Б-26.00.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		30

де n – частота обертання гвинта,

H – крок гребного гвинта,

V_a – швидкість натікання води.

Оптимальні значення ковзання залежать від крокового відношення H/D (відношення кроку гвинта до його діаметра). Для гвинтів із показником $H/D < 1,2$ рекомендоване значення ковзання становить $s = 0,14 - 0,16$. Якщо ж $H/D > 1,2$, оптимальний діапазон зменшується до $s = 0,12 - 0,14$.

Варто зазначити, що швидкісні легкі апарати потребують гвинтів із більшим кроком або підвищеним кроковим відношенням, тоді як важкі та малошвидкісні судна ефективніше працюють із гвинтами меншого кроку.

Для типових двигунів із робочим діапазоном частоти обертання приблизно від 1500 до 5000 об/хв оптимальні значення H/D приймають такі орієнтовні межі:

- для швидкохідних і спортивних суден, здатних переходити в глісерний режим – 0,9–1,5;
- для легких прогулянкових апаратів – 0,6–1,0;
- для важких і малошвидкісних суден та катерів – 0,55 – 0,80.

Слід враховувати, що наведені співвідношення є коректними для усталеного режиму роботи двигуна з частотою обертання близько 1000 об/хв, що відповідає орієнтовній швидкості руху близько 15 км/год.

З точки зору фізики процесу, гребний гвинт є пристроєм, що перетворює крутний момент вала двигуна на упор, тобто силу, яка забезпечує поступальний рух апарата у воді. Під час обертання гвинта на лопатях, звернених у бік руху, виникає зона зниженого тиску, тоді як на нагнітальній стороні лопатей формується підвищений тиск води. Різниця тисків призводить до виникнення підйомної сили Y .

Узагальнивши дію цієї сили, її можна розкласти на дві складові:

- силу P , спрямовану вздовж осі руху апарата, яка і створює тяговий упор гребного гвинта;

					038.Б-26.00.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		31

- силу T , перпендикулярну до напрямку руху, яка формує крутний момент, необхідний для обертання гвинта.

Саме баланс між цими складовими визначає ефективність роботи гребного гвинта та всієї рушійної системи підводного апарата.

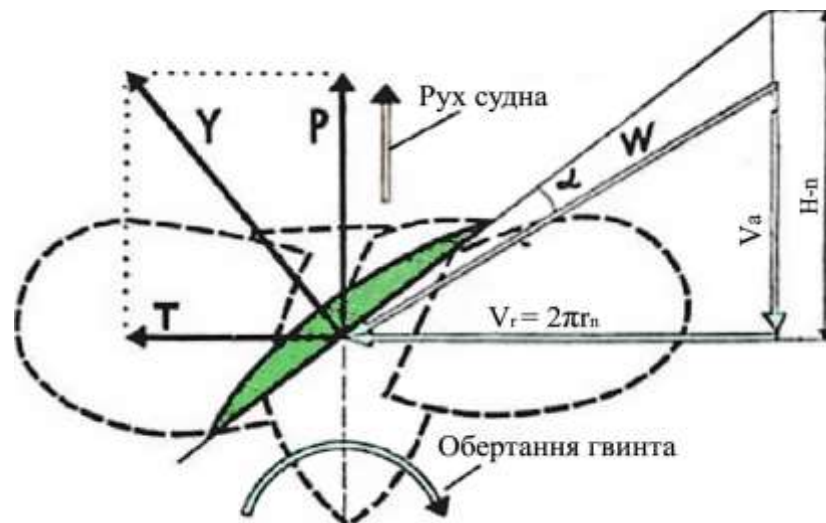


Рисунок 2.10 – Схема швидкостей і сил, що діють на лопать гребного гвинта правого обертання

На рисунку 16 наведено векторну схему швидкостей та сил, які діють на окреме поперечне січення лопаті гребного гвинта. Для аналізу роботи гвинта розглянемо елементарну ділянку лопаті, розташовану на певному радіусі r від осі обертання.

Лінійна (окружна) швидкість точки лопаті V визначається залежно від її віддаленості від центра обертання та частоти обертання гвинта. Вона може бути описана співвідношенням:

$$V=2\pi r n,$$

де n – частота обертання гвинта, виражена в об/с;

r – радіус розглянутого поперечного перерізу лопаті.

Із наведеної формули випливає, що зі збільшенням радіуса r , тобто при наближенні розглядуваної ділянки до кінця лопаті, окружна швидкість V зростає. Відповідно, збільшується і повна (результуюча) швидкість взаємодії лопаті з потоком води W , яка є геометричною сумою осьової та окружної складових.

Знову звертаючись до рисунка 16, а саме до вектора окружної швидкості V , можна зауважити, що його модуль для кожного конкретного радіуса є постійним. Проте зі зростанням радіуса виникає необхідність змінювати орієнтацію профілю лопаті – її слід повертати під більшим кутом до осі гвинта. Це потрібно для того, щоб кут атаки лопаті відносно осі гвинта залишався оптимальним і приблизно однаковим для всіх поперечних перерізів.

Саме виконання цієї умови призводить до формування постійного кроку H гвинта по всій його довжині. Крок гвинта характеризує осьове переміщення будь-якої точки лопаті за один повний оберт гвинта навколо своєї осі.

Розглянемо гребний гвинт як просторову геометричну фігуру – складну гвинтову поверхню, що показано на рис. 2.11. Під час обертання кожна лопаті ковзає вздовж умовних напрямних ліній, які мають різні радіуси та довжини, але однакову висоту, що дорівнює кроку H . У результаті цього за один повний оберт гвинта будь-яка точка лопаті незмінно зміщується вздовж осі обертання на одну й ту ж величину H .

Звідси випливає важливий висновок: осьова швидкість переміщення, створювана гребним гвинтом, визначається як добуток кроку гвинта на частоту його обертання. Саме ця залежність лежить в основі розрахунків поступальної швидкості підводного апарата та узгодження гвинта з параметрами електродвигуна.

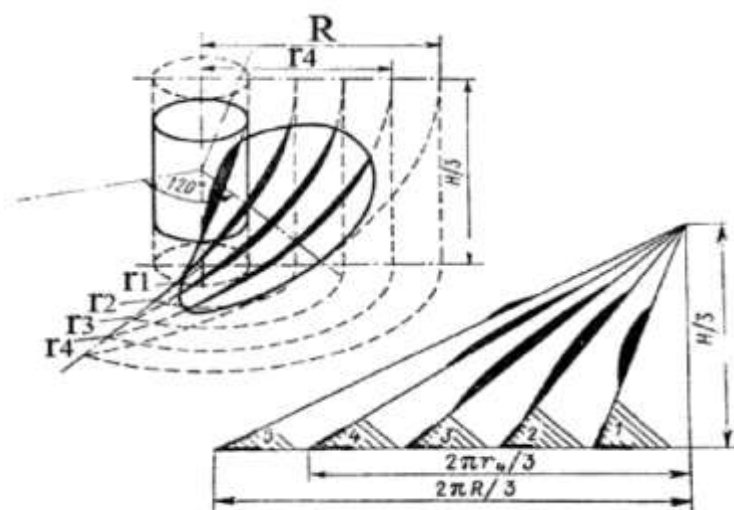


Рисунок 2.11 – Складна гвинтова поверхня лопаті та косинці кроку

					038.Б-26.00.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		33

Кут атаки лопаті безпосередньо впливає на величину упору гребного гвинта та ефективність використання потужності рушійного двигуна. Оптимальне значення кута профілю лопаті, як правило, знаходиться в межах 4–8°. У разі перевищення цього діапазону значна частина механічної енергії двигуна витрачається нераціонально через зростання гідродинамічного опору. Якщо ж кут атаки є надто малим, то підйомна сила на лопаті зменшується, унаслідок чого упор гребного гвинта стає недостатнім, а встановлена потужність двигуна використовується не повністю.

На рис. 2.11 показано характер взаємодії лопаті гребного гвинта з водним потоком. Кут атаки α можна визначити як кут між напрямком вектора швидкості потоку, що набігає на лопать, позначеного W , та площиною нагнітальної поверхні лопаті. При цьому результуючий вектор швидкості W формується в результаті векторної суми поступальної швидкості руху гвинта разом із телекерованим безпілотним апаратом і окружної швидкості, зумовленої обертанням лопаті у площині, перпендикулярній до осі гвинта.

Таким чином, режим роботи гребного гвинта та величина сил, що виникають на його лопатях, визначаються співвідношенням між поступальною та обертальною складовими швидкості, а також геометрією профілю лопаті. Саме ці фактори впливають на гідродинамічний опір руху телекерованого безпілотного підводного апарата, який у подальшому може бути оцінений за відповідною аналітичною залежністю.

$$R = \frac{\zeta \cdot \rho \cdot V^2 \cdot \Omega}{2} \quad (2.3)$$

де ρ – густина води, яка для морської води приймається рівною 1025 кг/м³;

ζ – коефіцієнт повного гідродинамічного опору;

Ω – сумарна змочена поверхня корпусу, в м².

Величина гідродинамічного опору корпусу судна або телекерованого безпілотного підводного апарата значною мірою визначається його геометричною формою. Оскільки точний аналітичний опис форми корпусу є надзвичайно складним, у практичних розрахунках використовують систему

					038.Б-26.00.00.00.000.ПЗ	Арк.
						34
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

узагальнених коефіцієнтів. Значення цих коефіцієнтів безпосередньо впливають на ходові характеристики апарата, зокрема на швидкість руху, енерговитрати та необхідну потужність рушійної установки.

Корисна потужність, яку розвиває гребний гвинт, визначається співвідношенням:

$$N = P(1 - t) \frac{V_a}{1 - w} \quad (2.4)$$

де P – упор гребного гвинта;

V – швидкість руху апарата;

w – коефіцієнт попутного потоку, що враховує вплив руху корпусу на швидкість води біля гвинта;

t – коефіцієнт засмоктування, який характеризує втрати тяги, спричинені взаємодією гвинта з корпусом.

Для подальшого аналізу розглянемо спрощену модель ідеального гребного гвинта. У цьому випадку вважають, що упор гвинта дорівнює зміні імпульсу рідини, яка проходить через його диск. Тоді упор можна подати у вигляді:

$$P = m' \cdot \Delta V$$

де m' – масова витрата води, приведеної в рух гвинтом;

ΔV – приріст осьової швидкості потоку.

Беручи до уваги симетрію потоку та подвоєння ефекту прискорення рідини до і після гвинта, вираз для упору можна записати як:

$$P = \frac{1}{2} \rho \pi D^2 C_a^2 \quad (2.5)$$

$$C_a = \sqrt{\frac{2P}{\rho \pi D^2}} \quad (2.6)$$

Отримане співвідношення є базовим для подальших розрахунків параметрів гребного гвинта та дозволяє оцінити взаємозв'язок між упором, швидкістю індукованого потоку і енергетичними характеристиками рушійної системи телекерованого безпілотної підводного апарата.

					038.Б-26.00.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		35

Упор несучого гребного гвинта є результатом передавання певної кількості імпульсу потоку води, що проходить крізь площину його лопатей. Під час роботи гвинт прискорює масу рідини, внаслідок чого виникає реактивна сила, спрямована вздовж осі руху телекерованого безпілотного підводного апарата.

Для ідеалізованої моделі несучого гвинта можна ввести поняття корисної потужності, яка характеризує мінімально необхідну енергію для створення заданого упору. Відповідна залежність має вигляд:

$$n_H = \frac{P \cdot C_{a1}}{75N} \quad (2.7)$$

де n_H – відносний коефіцієнт корисної дії гребного гвинта;

P – упор гвинта;

C_{a1} – індукована (осьова) швидкість потоку;

N – потужність, що споживається рушійною установкою.

Величина n_H визначається як відносний ККД гвинта і вводиться шляхом порівняння теоретично мінімально необхідної потужності, потрібної для створення упору, з реальною потужністю, що підводиться до гвинта від електродвигуна. Таким чином, даний параметр дозволяє оцінити ефективність перетворення енергії обертання у поступальний рух апарата.

Для ідеального гвинта відносний коефіцієнт корисної дії можна подати у розширеному вигляді:

$$n_H = \frac{\sqrt{2P}}{75ND} \sqrt{\frac{P}{\rho\pi}} \quad (2.8)$$

Отриманий вираз демонструє, що ефективність роботи гребного гвинта залежить не лише від розвиваного упору та споживаної потужності, а й від його геометричних параметрів і фізичних властивостей середовища. Це підтверджує необхідність узгодженого вибору діаметра гвинта, режимів роботи двигуна та умов експлуатації телекерованого безпілотного підводного апарата для досягнення максимальної енергоефективності.

Для даного телекерованого безпілотного підводного апарата приймаємо такі початкові параметри гребного гвинта: діаметр гвинта $D=0,074\text{м}$, а

					038.Б-26.00.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		36

потужність електродвигуна $N=0,012\text{кВт}$. На основі цих даних виконується розрахунок упору гвинта за відповідною залежністю.

$$1 = \frac{\sqrt{2P}}{75 \cdot 0,012 \cdot 0,074} \sqrt{\frac{P}{104 \cdot 3,14}} \quad (2.10)$$

У результаті розрахунку отримано значення упору:

$$P=0,9 \text{ кгс} \approx 9 \text{ Н}$$

Проектування гребного гвинта також здійснюється з урахуванням потужності безколекторного електродвигуна та частоти його обертання. Одним із важливих параметрів є кількість лопатей, яка впливає як на коефіцієнт корисної дії, так і на вібраційні характеристики рушія. Зі збільшенням кількості лопатей ККД зменшується, тоді як надто мала кількість призводить до появи вібрацій і нестабільності роботи. Тому оптимальне число лопатей визначається шляхом розрахунку за емпіричним співвідношенням:

$$K_d = D \cdot V_p \sqrt{\frac{\rho}{P}} \quad (2.11)$$

де D – діаметр гвинта, м (у даному випадку $D=0,074$ м);

V_p – розрахункова швидкість натікання водного потоку, м/с;

Розрахункова швидкість натікання води визначається з урахуванням коефіцієнта попутного потоку за формулою:

$$V_p = V(1 - \Psi) \quad (2.12)$$

де V – швидкість руху води, прийнята рівною 3 м/с;

Ψ – коефіцієнт попутного потоку, який для даного апарата становить 0,299.

Підставивши значення, отримаємо:

$$V_p = V(1 - \Psi) = 3 \cdot (1 - 0,299) = 2,103 \text{ м/с} \quad (2.13)$$

Далі підставляємо отримані значення у формулу (2.11):

$$K_d = D \cdot V_p \sqrt{\frac{\rho}{P}} = 0,074 \cdot 2,1 \sqrt{\frac{1,025}{9}} = 0,165$$

Оскільки умови роботи характеризуються невеликим навантаженням, а значення коефіцієнта $K_d < 2$, доцільно прийняти кількість лопатей гвинта $z=3$, що забезпечує оптимальний баланс між ефективністю та стабільністю роботи.

					038.Б-26.00.00.00.000.ПЗ	Арк.
						37
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Величина створюваного упору значною мірою залежить від кута атаки α профілю лопаті. Для швидкохідних гребних гвинтів оптимальним вважається діапазон $4 - 8^\circ$. Якщо кут атаки перевищує рекомендовані значення, потужність двигуна витрачається неефективно через збільшення крутного моменту. Навпаки, за надто малого кута атаки підйомна сила на лопаті та упор гвинта зменшуються, що призводить до недовикористання потужності рушійної установки.

У зв'язку з цим наступним етапом є визначення геометричного кута установки гребного гвинта, який розраховується за відповідними аналітичними залежностями, що враховують швидкість потоку, частоту обертання та крок гвинта.

Розрахуємо вектор швидкості набігання:

$$V_r = 2\pi r h \quad (2.14)$$

$$V_r = 2 \cdot 3.14 \cdot 0.38 \cdot 0.45 = 10.7$$

$$V_a = C \cdot a_2 / 2$$

де a – тангенс кута нахилу кривої коефіцієнта $a = \frac{dcy}{da}$

Крок гребного гвинта є другою за значущістю технічною характеристикою після діаметра. Під кроком гвинта розуміють відстань, на яку він перемістився б уздовж своєї осі за один повний оберт у щільному середовищі без ковзання. Іншими словами, це теоретичне осьове переміщення гвинта за один оберт у разі ідеальних умов роботи.

Геометрично крок гвинта визначається через кут нахилу лопаті відносно горизонтальної осі крильчатки. У практиці проектування значення кроку зазвичай задається в дюймах та може бути обчислене за співвідношенням:

$$H = \sin(\alpha) \cdot D \cdot 2,54 \quad (2.15)$$

де α – кут нахилу (атаки) лопаті;

D – діаметр гребного гвинта; множник 2,54 використовується для переведення значень у дюймову систему вимірювання.

					038.Б-26.00.00.00.000.ПЗ	Арк.
						38
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Товщина поперечного перерізу лопаті гвинта t встановлюється відповідно до вимог ТУ 5.961. З урахуванням того, що запроєктований гвинт належить до «звичайної» групи, а його діаметр не перевищує 0,8 м, було прийнято нормативне значення товщини лопаті, яке дорівнює 2 мм. Дотримання цієї вимоги забезпечує необхідний запас міцності без суттєвого збільшення гідродинамічного опору.

Крім того, у конструктивну модель розроблюваного елемента було введено додатковий складальний вузол – захисний кожух гребного гвинта. Його призначення полягає в запобіганні потраплянню сторонніх предметів, сміття або елементів підводного середовища в зону обертання гвинта, що знижує ризик механічних пошкоджень і підвищує експлуатаційну надійність рушійної системи.

Додатковою перевагою застосування кожуха є формування більш щільного та спрямованого вихідного потоку води. Це сприяє підвищенню швидкості руху телекерованого безпілотної підводного апарата за рахунок зменшення турбулентних втрат і покращення умов роботи гвинта. На рис. 2.12 наведено вигляд захисного кожуха у поперечному розрізі, що ілюструє його конструктивне виконання та принцип дії.

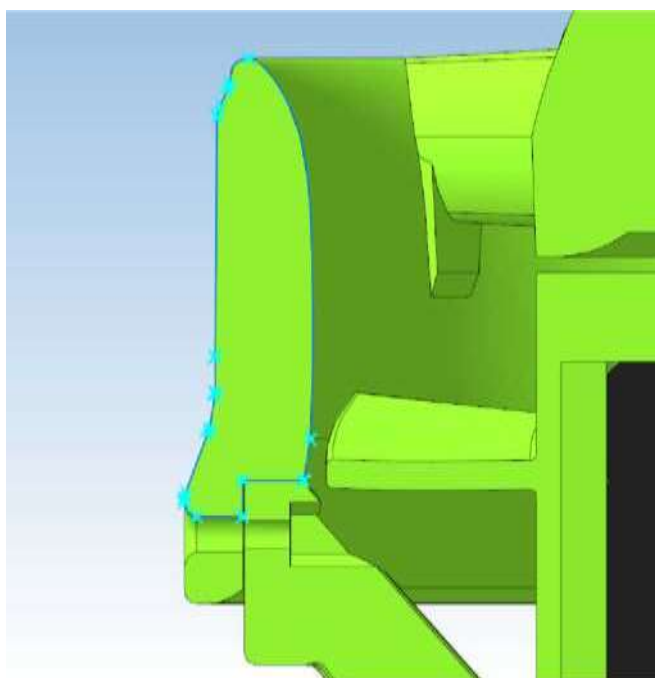


Рисунок 2.12 – Захисний кожух гвинта

					038.Б-26.00.00.00.000.ПЗ	Арк.
						39
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Під час проектування підводного апарата принципово важливо розглядати не лише його внутрішню компоновку, а й конструкцію в цілому. Зокрема, необхідно визначити оптимальну кількість рушійних двигунів, обґрунтувати їх просторове розташування, встановити основні та допоміжні режими роботи, оцінити допустимі діаметри гребних гвинтів, а також узгодити потужність і масо-габаритні характеристики встановлюваних двигунів із параметрами всього апарата.

Розрахунок рушійного двигуна включає гідродинамічний аналіз та перевірку на міцність елементів рушійної установки. У процесі підбору можливі ситуації, коли обраний двигун має надлишкову потужність або масу порівняно з реальними потребами апарата, що негативно впливає на енергетичну ефективність і плавучість системи.

Експериментальні (модельні) випробування двигуна доцільно поєднувати з випробуваннями самого телекерованого безпілотної підводного апарата. У такому разі важливо визначати не лише величину гідродинамічного опору, а й уточнювати коефіцієнти взаємодії між рушіями та корпусом, які суттєво впливають на тягові й маневрові характеристики.

Слід зазначити, що для рушійних систем глибоководних апаратів явища кавітації, як правило, не є критичними. Це дає змогу в окремих випадках застосовувати гребні гвинти з вищими робочими показниками, ніж у надводних суден. Разом із тим, якщо апарат повинен функціонувати не лише під водою, а й на поверхні, необхідно виконувати додаткові розрахунки з урахуванням можливості виникнення кавітаційних режимів. На рисунку 19 наведено приклад електродвигуна, запланованого для встановлення на апарат.

Під час розрахунку параметрів гребного гвинта необхідно вирішити такі основні задачі:

1. На основі конструктивних вимог відомий діаметр гвинта, який у даному проекті прийнято рівним $D=74$ мм. Також враховується позитивна плавучість апарата. Необхідно визначити такі геометричні та гідродинамічні

					038.Б-26.00.00.00.000.ПЗ	Арк.
						40
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

параметри гвинта, які дозволять створити заданий упор Р за мінімальних витрат потужності.

2. За заданих значень діаметра гвинта та потужності приводного електродвигуна $N=80$ Вт потрібно підібрати параметри гвинта, що забезпечують максимально можливий упор, зберігаючи при цьому допустимі режими навантаження двигуна і стійку роботу рушійної системи.

Результати розв'язання зазначених задач дозволяють узгодити характеристики гребного гвинта з параметрами двигуна та корпусу, що є необхідною умовою для досягнення ефективної, надійної й енергоощадної роботи телекерованого безпілотного підводного апарата.



Рисунок 2.13 – Досліджуваний електродвигун DXW BRF2838

3. На основі технічних характеристик обраного електродвигуна можна визначити, що його швидкісна характеристика становить 350 об/В. За робочої напруги це відповідає орієнтовній частоті обертання близько 3950 об/хв, що є достатнім показником для використання в рушійній установці телекерованого безпілотного підводного апарата.

4. Коефіцієнт корисної дії пари «гребний гвинт – електродвигун» визначається за відповідною розрахунковою залежністю, у якій враховуються кінематичні та силові параметри системи. При цьому використовуються такі вихідні дані:

- R – радіус гребного гвинта, який дорівнює 37 мм;
- v – окружна швидкість обертання лопатей гвинта. З урахуванням радіуса 37 мм і частоти обертання двигуна 1770 об/хв, лінійна швидкість становить приблизно 24,6 км/год;

					038.Б-26.00.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		41

- М – крутний момент двигуна, що дорівнює 0,28 Н·см.

Значення коефіцієнта корисної дії є узагальненою оцінкою ефективності роботи гребного гвинта та всієї рушійної системи в цілому. Для ідеальних або добре узгоджених винищувальних схем максимальний ККД може досягати 70 – 80 %, однак для малих суден і компактних підводних апаратів практичні значення зазвичай знаходяться в діапазоні 35 – 50 %. Саме ці величини доцільно приймати як орієнтир під час оцінювання енергетичної ефективності проекрованої рушійної установки.

$$\eta = \frac{0,038 \cdot 24,62}{3,14 \cdot 1770 \cdot 0,0028} \cdot 100 = 30\%$$

Отримані результати підтверджують, що обраний електродвигун за своїми швидко-силовими параметрами може бути ефективно використаний у складі гребної системи телекерованого безпілотного підводного апарата, за умови правильного підбору геометрії гвинта та режимів роботи двигуна.

Одним із визначальних параметрів рушійної установки телекерованого безпілотного підводного апарата є тяга гребного гвинта. Величина тяги визначається через співвідношення між споживаною потужністю, швидкістю потоку та коефіцієнтом корисної дії системи й може бути розрахована за формулою:

$$T = \frac{75 \cdot P}{v} \cdot \eta \quad (2.16)$$

де Р – споживана потужність, виражена у кінських силах;

v – лінійна швидкість потоку, м/с (або еквівалент у км/год);

η – коефіцієнт корисної дії рушійної пари «двигун – гвинт».

Споживана потужність двигуна становить 0,012 кВт, що при перерахунку у кінські сили дорівнює: P=0,0120,074≈0,11 к.с., оскільки 1 к.с. = 0,74 кВт.

Підставивши числові значення у формулу та прийнявши швидкість потоку v=24,6 км/год, отримаємо:

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

					038.Б-26.00.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		42

Оскільки $1 \text{ кгс} \approx 9,81 \text{ Н}$, розрахункове значення тяги одного рушія становить приблизно: $T \approx 3 \text{ Н}$.

Таким чином, у подальших розрахунках доцільно приймати, що один двигун створює тягове зусилля на рівні близько 3 Н , що є достатнім для забезпечення руху та маневрування телекерованого безпілотного підводного апарата у заданих умовах експлуатації.

2.5 Плавучість підводного апарата та його стійкість

У результаті завершення проектування телекерований безпілотний підводний апарат повинен мати нульову плавучість. Для обґрунтування цієї вимоги необхідно детально розглянути поняття плавучості, її фізичний зміст і числові характеристики, а також умови рівноваги тіла у водному середовищі.

Плавучість – це властивість твердого тіла, зануреного в рідину, зберігати рівноважний стан, не спливаючи на поверхню і не занурюючись далі, тобто перебувати в стані «плавання» на певній глибині. Дана властивість визначається співвідношенням між силою тяжіння тіла та виштовхувальною силою, що діє на нього з боку рідини.

У теорії кораблебудування та підводної техніки виділяють декілька понять, пов'язаних із плавучістю. Одним із них є запас плавучості, який характеризує здатність апарата або судна залишатися на плаву за наявності заданого навантаження чи при частковому порушенні герметичності. Найчастіше це поняття застосовується до надводних суден і визначає можливість збереження їх на поверхні води за різних експлуатаційних умов.

Запас плавучості зазвичай виражається у відсотках як відношення об'єму водонепроникних відсіків, розташованих вище ватерлінії, до загального водонепроникного об'єму корпусу. Порушення герметичності окремих відсіків призводить до зменшення цього запасу і, відповідно, до зниження рівня безпеки об'єкта.

					038.Б-26.00.00.00.000.ПЗ	Арк.
						43
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Для підводних апаратів ключовим є не запас плавучості, а досягнення балансу сил, за якого апарат має або нульову, або слабо позитивну плавучість. Рівняння рівноваги за плавучістю може бути записане у вигляді:

$$P = \gamma (V_0 - V_h) \quad (2.17)$$

де P – сила ваги апарата;

γ – питома вага води;

V_0 – повний об'єм підводного апарата;

V_h – об'єм частини корпусу, що не бере участі у створенні сили виштовхування.

Дотримання цього співвідношення забезпечує нейтральну плавучість, за якої телекерований безпілотний підводний апарат може стабільно утримувати глибину занурення без постійної роботи рушійних двигунів. Це, у свою чергу, знижує енергоспоживання, підвищує точність маневрування та покращує загальну стабільність апарата під час виконання підводних операцій.

Нейтральна плавучість – це стан, за якого запас плавучості дорівнює нулю. Для наочного пояснення можна розглянути приклад надводного судна та його надводної частини: якщо об'єм води, що потрапила всередину корпусу, точно дорівнює наявному запасу плавучості, вважають, що плавучість повністю втрачена. У такому режимі навіть незначний зовнішній вплив може спричинити подальше занурення судна під воду. З огляду на те, що у водному середовищі діє велика кількість збурюючих факторів, такий стан і характеризує нейтральну плавучість.

Від'ємна плавучість виникає у випадках, коли об'єм води, що надходить у корпус, перевищує запас плавучості. За таких умов об'єкт уже не здатний утримуватися у рівновазі у воді та неминуче продовжує занурюватися. Саме тому для суден і підводних апаратів передбачаються додаткові, обов'язкові елементи запасу плавучості, які повинні залишатися неушкодженими для забезпечення безпечного режиму експлуатації.

Розглянемо модель розроблюваного телекерованого безпілотного підводного апарата, основні вузли якого були спроектовані та розраховані на

					038.Б-26.00.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		44

попередніх етапах. На побудованій тривимірній моделі, зображеній на рис.2.14 та 2.15, позначено точку центра мас апарата. Вона розташована нижче його геометричного центра, що свідчить про правильний баланс конструкції. Завдяки такому рішенню, а також використанню поплавкових елементів із пористого пінопласту, апарат не схильний до перекидання та не спливає у нестійкому положенні «догори днищем». Натомість він забезпечує рівномірне та кероване занурення і спливання у водному середовищі.

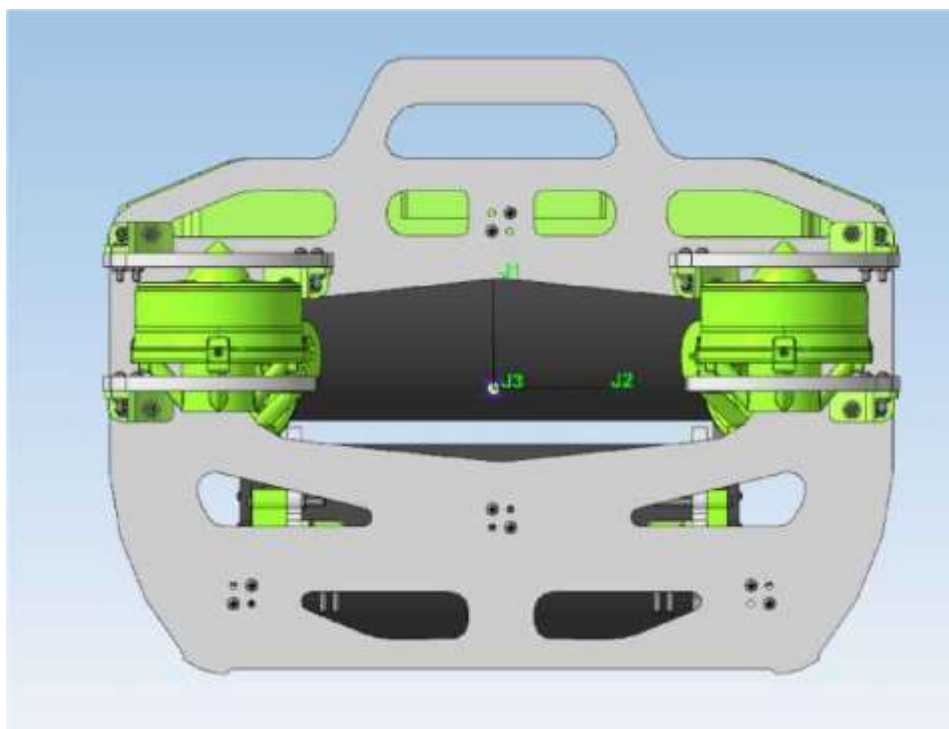


Рисунок 2.14 – Вигляд апарата справа

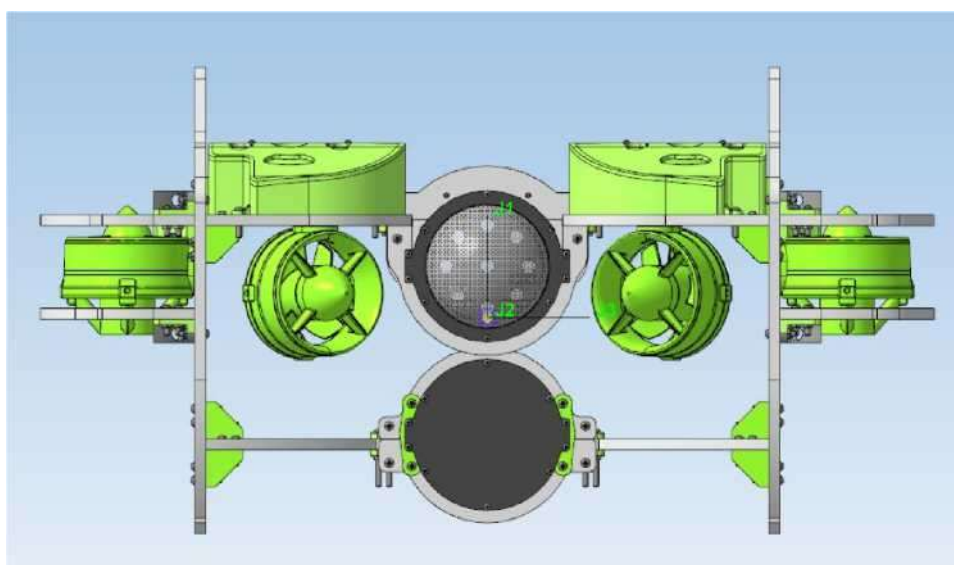


Рисунок 2.15 – Вигляд апарата спереду

					038.Б-26.00.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		45

Поплавкові елементи заплановано розмістити у спеціально передбачених верхніх відсіках, які надійно закріплюються до основного корпусу апарата. У цих відсіках виконані отвори, що дозволяють воді вільно проходити крізь їх об'єм, не створюючи додаткових гідродинамічних перешкод та не впливаючи негативно на стійкість апарата.

Окремої уваги заслуговує питання гідродинамічного опору, яке частково розглядалося раніше під час аналізу роботи гребного гвинта. На цьому етапі необхідно виконати розрахунок опору руху всього апарата за його переміщень у різних площинах. Це обумовлено тим, що рух телекерованого безпілотного підводного апарата не обмежується однією віссю: він виконує поступальні переміщення, повороти та обертання у всіх трьох просторових площинах.

Розглядаючи рух апарата у відкритому водоймищі, необхідно враховувати низку параметрів і коефіцієнтів опору. Одним із таких є число Рейнольдса, яке являє собою безрозмірну величину та характеризує співвідношення інерційних сил до сил в'язкого тертя у рідинах і газах. Значення числа Рейнольдса дозволяє визначити режим течії – ламінарний або турбулентний. Критичне число Рейнольдса відповідає швидкості, за якої відбувається перехід від ламінарного до турбулентного руху води. Для потоків в умовах відкритих русел це значення зазвичай становить $Re \approx 900$.

Для відкритих водних потоків число Рейнольдса визначають за аналітичною залежністю, яка враховує властивості рідини, геометрію тіла та характер взаємодії потоку з його поверхнею:

$$Re = \frac{\mu \cdot R}{\eta} \quad (2.18)$$

де η – динамічна в'язкість рідини;

μ – коефіцієнт тертя, між потоком рідини та матеріалом обтічного тіла;

ρ – густина рідини, у якій перебуває безпілотний підводний апарат;

R – гідравлічний радіус характерного перерізу;

v – швидкість потоку відносно апарата.

					038.Б-26.00.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		46

За невеликих швидкостей руху, коли значення числа Рейнольдса є меншим за критичне, поблизу поверхні обтічного тіла формується тонкий шар рідини, який «прилипає» до корпусу. Цей шар називають приграничним (пограничним) шаром, і саме в ньому зосереджуються основні в'язкі втрати енергії. Для циліндричних та близьких за формою тіл товщину приграничного шару можна оцінити за спрощеною інженерною формулою.

Для відкритих водойм прийнято вважати, що критичне число Рейнольдса дорівнює приблизно $Re \approx 900$. При досягненні цього значення ламінарний режим течії поступово переходить у турбулентний, що супроводжується різким зростанням опору руху.

Приймаючи характерний лінійний розмір обтічного тіла $l=0,464\text{ м}$ та критичне значення $Re=900$, можна оцінити товщину приграничного шару за залежністю: $\delta=lRe\approx 0,0155\text{ м}$

Отримане значення свідчить про наявність відносно тонкого приграничного шару, що суттєво впливає на гідродинамічні характеристики апарата, особливо за малих і середніх швидкостей руху.

Далі розглянемо гідродинамічний опір корпусу за швидкості руху апарата 2 м/с. Для цього вводиться коефіцієнт лобового опору C_x , числове значення якого залежить від геометрії тіла. Для тіл різної форми значення C_x наведені у довідкових графіках, зокрема на рис. 2.16.

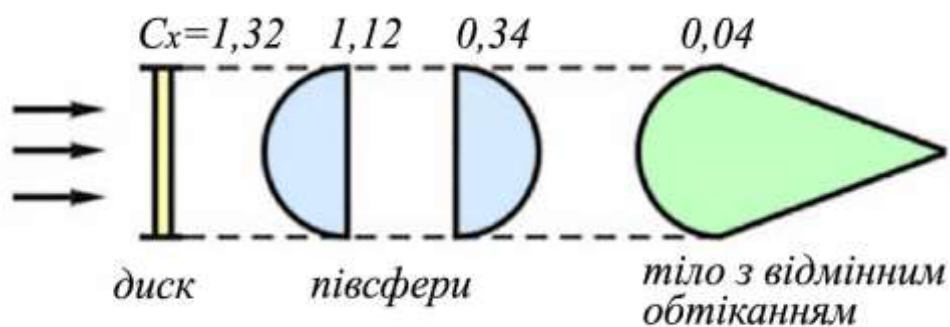


Рисунок 2.16 – Залежність гідродинамічного опору від форми тіла

Оскільки корпус розроблюваного телекерованого безпілотного підводного апарата не є ні ідеально обтічним, ні сильно загостреним, доцільно прийняти верхню межу коефіцієнта опору, яка для даного типу форми становить: $C=1,32$.

Вибір підвищеного значення коефіцієнта забезпечує консервативний підхід до розрахунку та дозволяє врахувати можливі додаткові втрати, пов'язані з нерівностями поверхні, виступаючими елементами конструкції та роботою апарата в реальних умовах експлуатації.

Для визначення гідродинамічного опору телекерованого безпілотного підводного апарата розглянемо його рух у трьох основних проекціях, які наведені на рис. 2.17 – 2.19. Такий підхід дозволяє оцінити силу опору в різних напрямках руху та під час маневрування.

У випадку руху апарата вперед лобовий опір визначається за фронтальною проекцією корпусу (рис. 2.17) і розраховується за формулою:

$$F_{C1} = C \cdot S_1 \frac{\rho v^2}{2} = 0,199 \text{ Н}$$

де $v=2 \text{ м/с}$ – розрахункова швидкість руху підводного апарата;

$\rho=1,025 \text{ г/см}^3$ – густина водного середовища;

$S_1=0,073874 \text{ м}^2$ – лобова площа фронтальної проекції корпусу;

C – коефіцієнт лобового опору, значення якого обирається залежно від форми тіла.

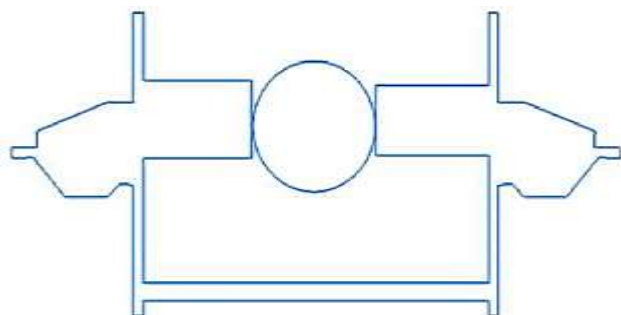


Рисунок 2.17 – Фронтальна проекція апарата

Далі виконаємо розрахунок бокового гідродинамічного опору, який виникає під час руху або зносу апарата у поперечному напрямку. Для цього

					038.Б-26.00.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		48

використовується та сама залежність, однак з урахуванням площі бокової проекції корпусу, яка становить: $S_2=0,212 \text{ м}^2$.

Тоді боковий опір дорівнює:

$$F_{C2} = C \cdot S_2 \frac{\rho v^2}{2} = 0,5737 \text{ Н}$$

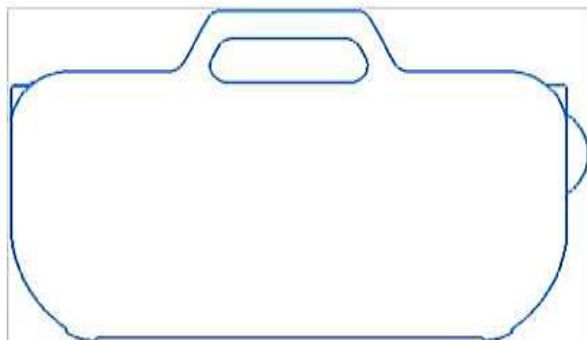


Рисунок 2.18 – Проекція апарата справа

Отримані значення свідчать про те, що гідродинамічний опір у боковій проекції істотно перевищує фронтальну складову. Це слід враховувати під час аналізу маневрових режимів роботи телекерованого безпілотного підводного апарата, зокрема при русі з боковими зсувами, стабілізації положення та виконанні розворотів у водному середовищі.

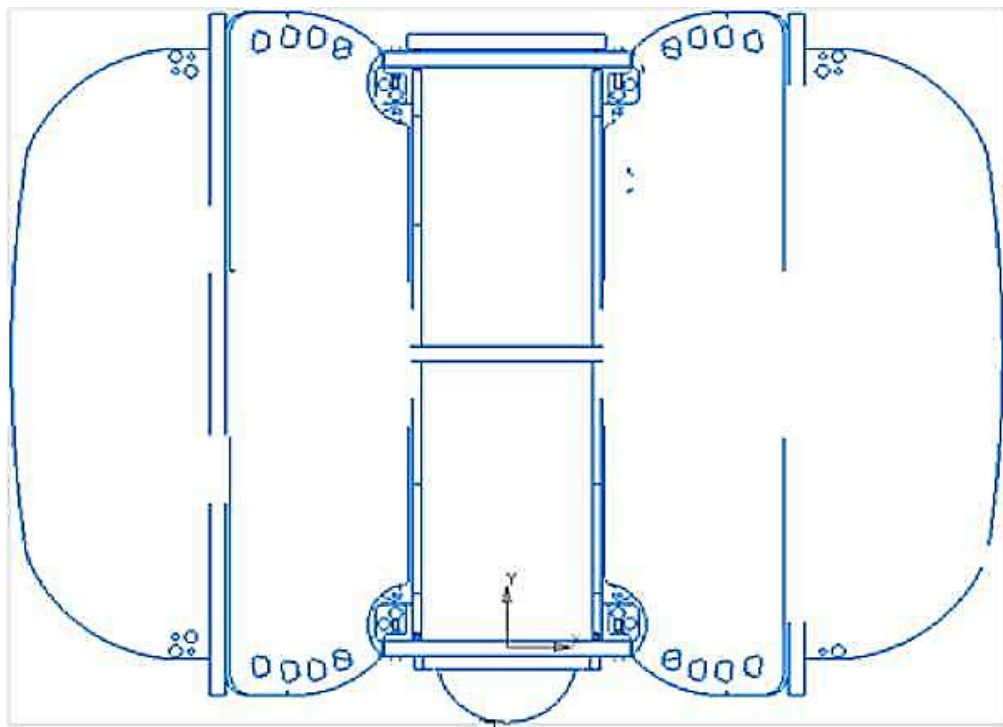


Рисунок 2.19 – Проекція апарата зверху

					038.Б-26.00.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		49

Далі розглянемо гідродинамічний опір апарата під час вертикального переміщення, тобто при зануренні або спливанні. Розрахунок виконується за тією самою залежністю, що й для попередніх проекцій, однак із використанням площі горизонтальної проекції корпусу, яка дорівнює: $S_3=0,245 \text{ м}^2$

Тоді сила опору при вертикальному русі становить:

$$F_{C3} = C \cdot S_3 \frac{\rho v^2}{2} = 0,663 \text{ Н}$$

Отримані значення гідродинамічного опору для трьох основних напрямків руху (фронтального, бокового та вертикального) у подальших розрахунках використовуються як складові сили опору, які віднімаються від сумарних рушійних зусиль, що створюються двигунами апарата. Такий підхід дозволяє підвищити точність і достовірність теоретичних розрахунків та наблизити математичну модель до реальних умов експлуатації. Саме ці дані в подальшому будуть перевірені під час практичних випробувань вже готового зразка телекерованого безпілотної підводного апарата.

					038.Б-26.00.00.00.000.ПЗ	Арк.
						50
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 3

ДОСЛІДНИЦЬКА ЧАСТИНА

3.1 Керування безпілотним підводним апаратом оглядового класу.

Кінематика руху

Для опису кінематики руху та подальшого виведення рівнянь руху підводного апарата необхідно ввести декілька систем координат, які дозволяють коректно описувати положення, орієнтацію та швидкісні параметри об'єкта у просторі. У даній роботі використовуються нерухома, зв'язана та швидкісна системи координат.

Нерухома система координат позначається як $O_0x_0y_0z_0$ і служить глобальною системою відліку, відносно якої описується положення підводного апарата у водному просторі. Початок цієї системи O_0 умовно вважається точкою старту або нульовою точкою відліку.

Зв'язана (або рухома) система координат задається як $O_px_py_pz_p$ і жорстко пов'язується з підводним апаратом. Її початок O_p розташований у центрі мас апарата, а осі O_px_p , O_py_p , O_pz_p використовуються для аналізу просторового руху, орієнтації та дії сил і моментів.

Окрім цього, вводиться швидкісна система координат $O_sx_sy_sz_s$ яка також жорстко пов'язана з центром мас апарата, проте її осі O_sx_s , O_sy_s , O_sz_s залишаються паралельними відповідним осям нерухомої системи координат $O_0x_0y_0z_0$. Такий підхід спрощує опис швидкісних складових руху та їх перетворення між системами координат. Графічне взаємне розташування всіх систем координат показано на рисунку 3.1.

Для опису орієнтації підводного апарата у тривимірному просторі використовуються кути Ейлера. Кожному з цих кутів відповідає матриця повороту розміром 3×3 , яка визначає перехід між системами координат. Для кожної з координатних осей (x , y , z) існує власна матриця елементарного повороту.

					038.Б-26.00.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		51

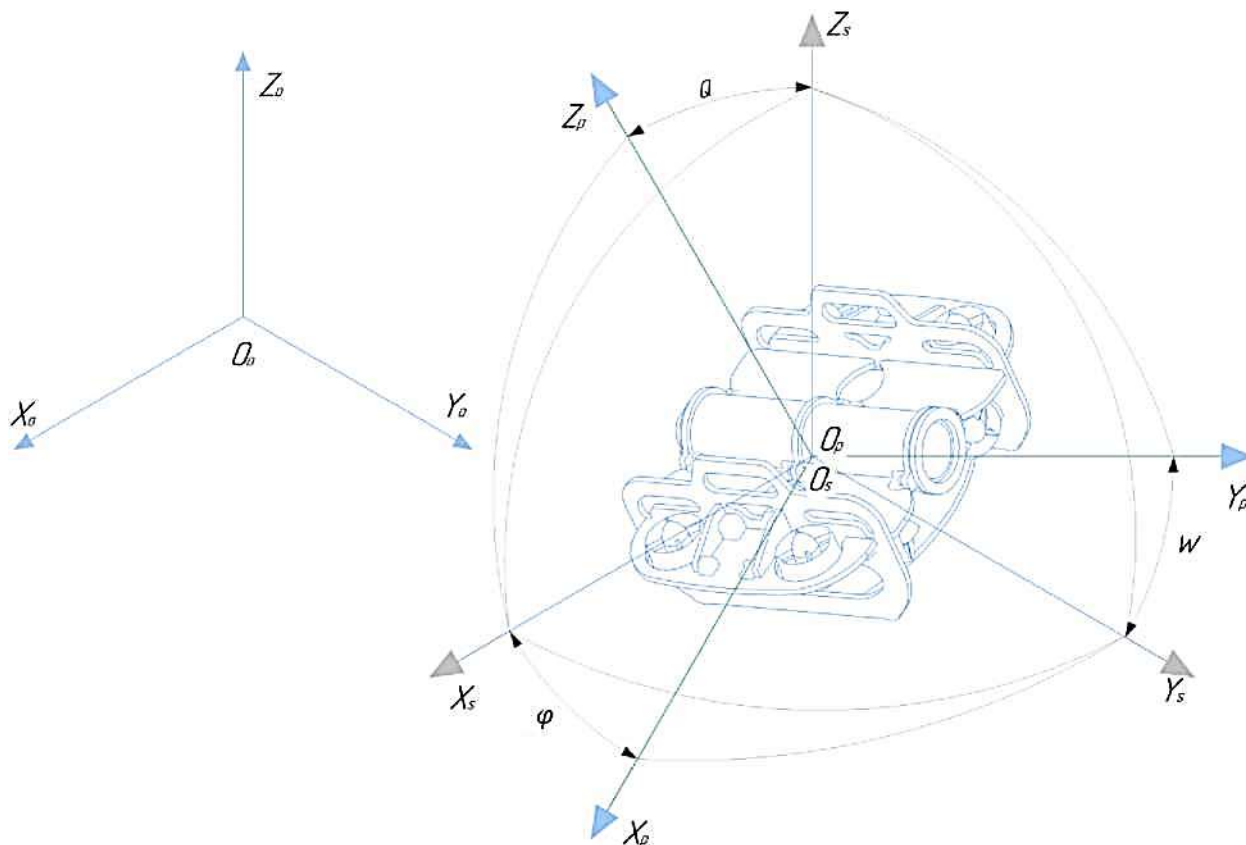


Рисунок 3.1 – Системи координат та їх взаємне розміщення

Таким чином, будь-яке довільне обертання тіла в тривимірному просторі може бути представлене як послідовна композиція поворотів навколо трьох взаємно перпендикулярних осей, наприклад осей декартової системи координат. Відповідно, загальна матриця повороту визначається як добуток трьох окремих матриць повороту, кожна з яких відповідає своєму куту Ейлера. Такий математичний апарат дозволяє формалізувати процес керування орієнтацією телекерованого безпілотної підводного апарата та є основою для побудови моделей управління й стабілізації руху.

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

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

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

(3.1)

В результаті отримуємо матрицю перетворення координат, яка зв'язує нерухому систему координат O_o, x_o, y_o, z_o ; та рухому систему координат O_p, x_p, y_p, z_p ; яка прив'язана до апарату

$$M(\varphi, \omega, \vartheta) = \begin{pmatrix} M_{11} & M_{12} & M_{13} \\ M_{21} & M_{22} & M_{23} \\ M_{31} & M_{23} & M_{33} \end{pmatrix} \quad (3.2)$$

де: $M_{11} = \cos(\varphi) * \cos(\psi)$ (3.3)

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

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

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

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

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

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

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

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

Для подальшого аналізу руху телекерованого безпілотного підводного апарата введемо основні терміни, що описують його орієнтацію та обертальні переміщення у просторі. Надалі в роботі використовуватимуться такі поняття, як рискання, тангаж і крен, які відповідають обертанням апарата в різних площинах.

– Рискання – це обертання апарата навколо вертикальної осі OZ , яке визначає зміну курсу або напрямку руху в горизонтальній площині.

– Тангаж – кут повороту навколо поперечної осі OY , що характеризує нахил апарата вперед або назад.

– Крен – обертання відносно поздовжньої осі OX , яке описує нахил апарата вліво або вправо відносно його подовжньої осі.

Використання зазначених кутів орієнтації дозволяє формалізувати тривимірний рух телекерованого безпілотного підводного апарата та є необхідним для побудови кінематичних і динамічних моделей керування, стабілізації та навігації в підводному середовищі.

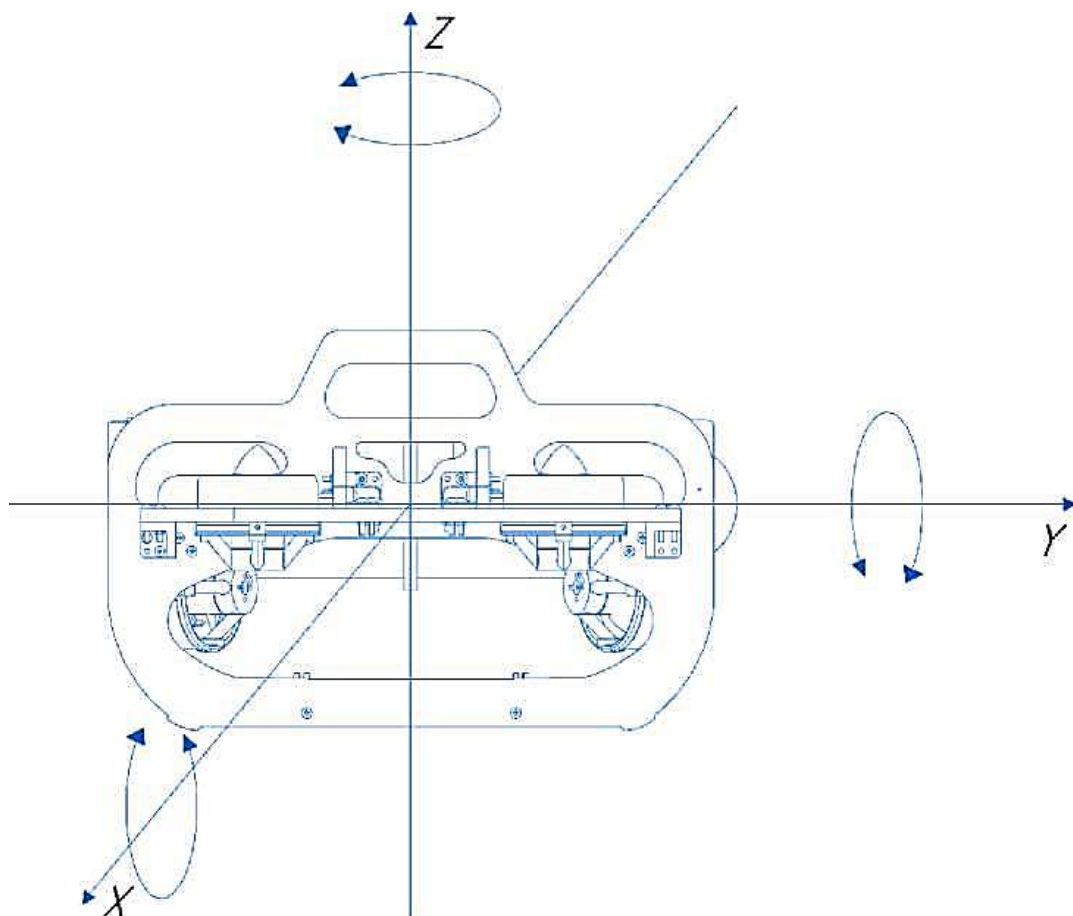


Рисунок 3.2 – Наочний зображення кутів ригання, тангаж, крен

Для стабільного руху підводного апарату, при його руху, необхідно виконання деяких умов, а саме:

$$\begin{aligned} V_{Ax} &= \text{const} & \omega_x &= \text{const} \\ V_{Ay} &= \text{const} & \omega_y &= \text{const} \\ V_{Az} &= \text{const} & \omega_z &= \text{const} \end{aligned}$$

Необхідно зробити перетворення для запису лінійного вектора швидкості, таким чином отримуємо:

$$V_A = \begin{pmatrix} V_{MX} \\ V_{MY} \\ V_{MZ} \end{pmatrix} = M(\varphi, \omega, \vartheta) * V = \begin{pmatrix} M_{11} & M_{12} & M_{13} \\ M_{21} & M_{22} & M_{23} \\ M_{31} & M_{23} & M_{33} \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} V_x \\ V_y \\ V_z \end{pmatrix} \quad (3.4)$$

Вектор швидкості в даній системі координат має напрямок, що визначається кутами α, β

Кут β – кут між вектором швидкості і пов'язаною системою координат: O_p, X_p, Y_p, Z_p .

Кут α – кут між вектором швидкості та віссю Ox пов'язаної системи координат, який проектується на поздовжню вісь. При цьому кут відраховується від вектора швидкості.

Таким чином, проекції швидкості на осі пов'язаної системи координат мають вигляд:

$$\begin{pmatrix} V_{Ax} = V * \cos(\beta) * \cos(\alpha) \\ V_{Ay} = -V * \sin(\alpha) * \cos(\beta) \\ V_{Az} = V * \sin(\beta) \end{pmatrix} \quad (3.5)$$

3.2 Динаміка руху. Виведення рівнянь руху підводного апарата

Існує декілька підходів до розрахунку та аналітичного виведення рівнянь руху підводних апаратів. Основна відмінність між цими методами полягає в особливостях конструкції апаратів, які умовно поділяють на закриті (із обтічним корпусом, подібним до форми торпеди) та відкриті, у яких окремі елементи конструкції є проникними для водного середовища. Розроблюваний у даній роботі телекерований безпілотний підводний апарат належить саме до другої групи, що необхідно враховувати під час формування математичної моделі його руху.

Розглянемо нерухому (інерційну) систему координат $O_0x_0y_0z_0$, у якій відбувається переміщення апарата. У межах цієї системи підводний апарат доцільно розглядати як тверде тіло, що рухається та обертається у тривимірному просторі під дією зовнішніх і внутрішніх сил та моментів.

Положення апарата відносно нерухомої системи координат задається радіус-вектором центру мас, а його орієнтація описується кутами Ейлера. Швидкість і прискорення визначаються як похідні відповідних координат за

					038.Б-26.00.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		55

часом. Такий підхід є класичним у теорії механіки та дозволяє побудувати загальну систему диференціальних рівнянь руху.

Запишемо класичні рівняння руху підводного апарата в нерухомій системі координат $O_0x_0y_0z_0$. Вони базуються на другому законі Ньютона та рівняннях моментів сил і відображають баланс сил і моментів, що діють на апарат, з урахуванням його масово-інерційних характеристик. Отримана система рівнянь є основою для подальшого аналізу динаміки руху, розроблення алгоритмів керування та моделювання поведінки телекерованого безпілотної підводного апарата в реальних умовах експлуатації.

$$\frac{d\bar{K}}{dt} = \bar{R}; \quad \frac{d\bar{L}}{dt} = \bar{M} \quad (3.6)$$

де $\bar{K}$ – головний вектор імпульсу,

$\bar{R}$ – головним вектором,

$\bar{L}$ – головний момент імпульсу,

$\bar{M}$ – головним моментом.

Далі, розглянемо рухому систему координат O_r, x_r, y_r, z_r , яка жорстко пов'язана з нашим апаратом. Рівняння руху ПА мають у ній вигляд:

$$\frac{d\bar{K}}{dt} + \bar{\Omega} * \bar{K} = \bar{R}; \quad \frac{d\bar{L}}{dt} + \bar{\Omega} * \bar{L} + \bar{v} * \bar{K} = \bar{M} \quad (3.7)$$

У цій системі координат початок відліку рухається з лінійною швидкістю v , а ПА обертається із кутовою швидкістю Ω . Далі, необхідно привести попередні 2 векторні рівняння до 6 скалярних.

$$\frac{d\bar{K}_x}{dt} + \bar{\omega}_y K_z - \bar{\omega}_z K_y = \bar{R}_x;$$

$$\frac{d\bar{K}_y}{dt} + \bar{\omega}_z K_x - \bar{\omega}_x K_z = \bar{R}_y;$$

$$\frac{d\bar{K}_z}{dt} + \bar{\omega}_x K_y - \bar{\omega}_y K_x = \bar{R}_z;$$

					038.Б-26.00.00.00.000.ПЗ	Арк.
						56
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$\frac{d\bar{L}_x}{dt} + \bar{\omega}_y L_z - \bar{\omega}_z L_y + \bar{v}_y K_z - \bar{v}_z K_y = \bar{M}_x;$$

$$\frac{d\bar{L}_y}{dt} + \bar{\omega}_x L_z - \bar{\omega}_z L_x + \bar{v}_z K_x - \bar{v}_x K_z = \bar{M}_y;$$

$$\frac{d\bar{L}_z}{dt} + \bar{\omega}_x L_y - \bar{\omega}_y L_x + \bar{v}_x K_y - \bar{v}_y K_x = \bar{M}_z;$$

Для того, щоб спростити рівняння, необхідно уявити проекцію імпульсу та моменту імпульсу через кінетичну енергію, таким чином ми отримаємо:

$$\begin{aligned} K_x &= \frac{dW}{dv_x} & K_y &= \frac{dW}{dv_y} & K_z &= \frac{dW}{dv_z} \\ L_x &= \frac{dW}{dw_x} & L_y &= \frac{dW}{dw_y} & L_z &= \frac{dW}{dw_z} \end{aligned} \quad (3.8)$$

$$\begin{aligned} W_A &= \frac{1}{2}m(v_x^2 + v_y^2 + v_z^2) + mv_x(w_y z - w_z y) + mv_y(w_z x - w_x z) + mv_z(w_x y - w_y x) \\ &\quad + \frac{1}{2}J_{xx} * w_x^2 + \frac{1}{2}J_{yy} * w_y^2 + \frac{1}{2}J_{zz} * w_z^2 - J_{xy}w_x w_y - J_{xz}w_x w_z \\ &\quad - J_{zy}w_z w_y \end{aligned} \quad (3.9)$$

де m – маса ПА, x_c, y_c, z_c – координати його центру, J_{xx}, J_{yy}, J_{zz} – моменти інерції, J_{xy}, J_{yz}, J_{zx} – відцентрові моменти інерції.

$$J_{xx} = \int (y^2 + z^2) dm; \quad J_{xz} = \int yz dm; \quad (3.10)$$

Далі, перетворимо вираз, пов'язаний з W_A у матричну форму:

$$W_A = 0.5[v^T \Omega^T] I \begin{bmatrix} v \\ \Omega \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

де $v = [v_x, v_y, v_z]^T$ і $\Omega = [w_x, w_y, w_z]^T$ – матриці лінійної та кутових швидкостей ПА; I – матриця інерціальності ПА, що розглядає його як абсолютно тверде тіло.

$$I = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 & 0 & m z_c & -m y_c \\ 0 & m & 0 & -m z_c & 0 & m x_c \\ 0 & 0 & m & m y_c & -m x_c & 0 \\ 0 & -m z_c & m y_c & I_{xx} & -I_{xy} & -I_{xz} \\ m z_c & 0 & -m x_c & -I_{xy} & I_{yy} & -I_{yz} \\ -m y_c & m x_c & 0 & -I_{xz} & -I_{yz} & I_{zz} \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

Якщо початок координат пов'язаної системи координат поєднано з центром мас ПА, його координати, мають значення, рівне $x_c=y_c=z_c=0$, і навіть відцентрові моменти $J_{xy}=J_{yz}=J_{zx}=0$; При припущеннях вираз кінетичної енергії спрощується, цим її можна уявити, як сума кінетичної енергії поступального руху центру мас і обертального навколо осей, які проходять через центр мас [5]. Таким чином, отримуємо:

$$W_B = 0.5[v^T \Omega^T] I_B \begin{bmatrix} v \\ \Omega \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

де I_B -матриця приєднувальних мас та моментів інерції для елементарного об'єму dV , матиме такий вигляд:

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

де V_1 – об'єм обмеженої внутрішньої поверхні ПА;

V_2 – обсяг простору, що займається зовнішньою поверхнею;

Однак, такий вираз не зручний для подання та використання, отже, можна спростити, вважаючи, при цьому, що матриця кінематичних параметрів містить елементи, які можна прийняти, як лінійні та кутові швидкості, тоді, можна перетворити:

$$W_A = 0.5[v^T \Omega^T] I \begin{bmatrix} v \\ \Omega \end{bmatrix} + 0.5[v^T \Omega^T] I_B \begin{bmatrix} v \\ \Omega \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

3.3 Математична модель керованого руху підводного апарату

Просторовий рух підводних апаратів зазвичай описується в 6-ти ступенях свободи [26], включаючи незалежні координати, необхідні для опису розташування і орієнтації. Вони записуються як системи нелінійних векторноматричних і диференціальних рівнянь, і мають такий вид:

$$\dot{f}(x(t)) = [c_1, c_2]x(t) = M_1(t) \cdot c_1x(t) + M_2(t) \cdot c_2x(t) \quad (3.15)$$

Для складання математичної моделі керованого руху підводного апарату можна використовувати кілька методик аналізу та синтезу [8]. Для більшості підводних апаратів траєкторію руху можна уявити, як сукупність окремих ділянок його руху у горизонтальній та вертикальних площинах. Для створення математичної моделі руху необхідно раціонально скористатися різними формами кінематичних умов руху для конкретно обраної площини та нахилу рівного 0 [6]. Для вертикальної площини справедлива форма:

$$f(x, \delta, t) = \begin{cases} D^{-1}(F - BDq); \\ w_z \\ v_x \cos \theta - v_y \sin \theta \\ v_x \sin \theta - v_y \cos \theta \end{cases} \quad (3.16)$$

Для горизонтальної площини:

$$f(x, \delta, t) = \begin{cases} D^{-1}(F - BDq); \\ w_y \\ v_x \cos \Psi - v_y \sin \Psi \\ v_x \sin \Psi - v_y \cos \Psi \end{cases} \quad (3.17)$$

де x - Вектор стану;

δ - Вектор керуючих впливів;

q - вектор узагальнених швидкостей;

F - Вектор зовнішніх сил та моментів;

D - Матриця приєднаних мас;

B - Матриця узагальнених швидкостей;

V_x, V_y, V_z - лінійні швидкості руху;

ω_y, ω_z - кутові швидкості руху;

					038.Б-26.00.00.00.000.ПЗ	Арк.
						59
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ψ – Кут курсу;

θ – Кут диферента.

На основі побудованих математичних моделей під час подальшого проектування системи керування виконується інтеграція функцій керування. Автоматизована система керування рухом підводного апарата повинна забезпечувати високі маневрові характеристики під час обстеження різноманітних об'єктів, у процесі огляду яких виконуються необхідні технологічні операції. Задавання відповідних функцій керування дозволяє формувати оптимальні траєкторії руху, що забезпечують ефективне маневрування апарата під час дослідження підводного середовища та об'єктів.

Під час розв'язання таких задач до системи керування висуваються підвищені вимоги щодо точності та якості руху, зокрема:

- забезпечення точного виведення робототехнічного комплексу в задану просторову точку;
- оптимізація траєкторії руху та мінімізація відхилень від заданого маршруту в контрольних точках;
- реалізація режимів динамічного позиціонування під час виконання робочих операцій.

Сучасні вимоги до високої точності руху за наявності нелінійних складових, притаманних об'єкту керування, відповідають так званому принципу несумісності. Сутність цього принципу полягає в тому, що підвищення точності динамічних процесів керованого руху підводного апарата супроводжується зростанням неточностей і невизначеностей математичної моделі, а також ускладненням опису водного середовища. У результаті процес побудови адекватної математичної моделі суттєво ускладнюється.

Проблеми високоточного керування підводними апаратами значною мірою зумовлені нелінійною динамікою систем, наявністю зовнішніх збурень і шумів у вимірювальних каналах. У зв'язку з цим доцільним є застосування методів нечіткої логіки, які дозволяють ефективно працювати в умовах невизначеності та неповної інформації. Дослідження, що ґрунтуються на

					038.Б-26.00.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		60

такому підході, залишаються актуальними, оскільки прикладні задачі мають різні умови виконання та параметри, а створення універсальної моделі, однаково ефективною для всіх випадків, є практично неможливим.

Для побудови нелінійної системи керування телекерованим безпілотним підводним апаратом у даній роботі пропонується використати нечітку модель типу Takagi - Sugeno (TS-модель). Загальний підхід до розв'язання задачі можна подати таким чином. Припустимо, що досліджуваний нелінійний параметр описується функцією виду $x'(t)=f(x(t))$, яка належить до певного сектору нелінійності. У загальному вигляді така система може бути представлена в матричній формі:

$$x'(t)=A_i x(t)+B_i u(t) \quad (3.18)$$

де $x(t)$ – вектор параметрів нелінійної системи;

$u(t)$ – вектор впливів керування;

A і B – матриці коефіцієнтів та параметрів, що відповідають окремим локальним моделям системи.

У випадках, коли визначення єдиного сектору нелінійності для всієї системи є складним або практично неможливим, доцільно виконати декомпозицію системи на декілька локальних секторів, кожен з яких описується спрощеною моделлю. Надалі ці локальні моделі об'єднуються в єдину нечітку систему керування, що забезпечує достатню точність опису динаміки й ефективність керування телекерованим безпілотним підводним апаратом у широкому діапазоні режимів роботи.

Нам необхідно знайти $x(t) = f(x(t))$ з $[c_1, c_2] x(t)$. З сектору нелінійності рис.3.2 можна визначити:

$$f(x(t)) \in [c_1, c_2] x(t) = M_1(t) \cdot c_1 x(t) + M_2(t) \cdot c_2 x(t) \quad (3.19)$$

де $a(t)$ – досліджуваний нами параметр;

$M_1(t)$ та $M_2(t)$ – нечіткі значення.

При цьому, 2 лінійні рівняння $c_1 x(t)$ і $c_2 x(t)$ лінеаризують дану нелінійну функцію рис.3.3.

					038.Б-26.00.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		61

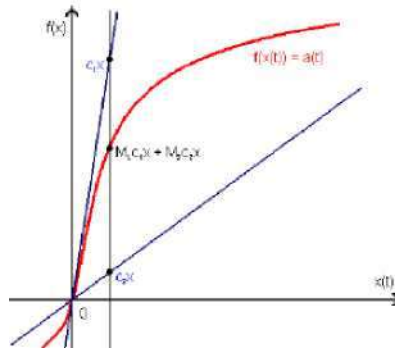


Рисунок 3.3 – Геометричне уявлення локального сектора нелінійності

Таким чином отримуємо, що $M_1(t)$ і $M_2(t)$ мають такий вигляд:

$$M_1(t) = \frac{a(t) - c_2x(t)}{c_1x(t) - c_2x(t)} \text{ та } M_2(t) = \frac{c_2x(t) - a(t)}{c_1x(t) - c_2x(t)} \quad (3.20)$$

$$M_1(t), M_2(t) \geq 0 \text{ та } M_1(t) + M_2(t) = 1$$

Якщо говорити про функцію приналежності, $a(t)$, то при використанні виразів (3.18) та (3.19) можна отримати рисунок 3.4:

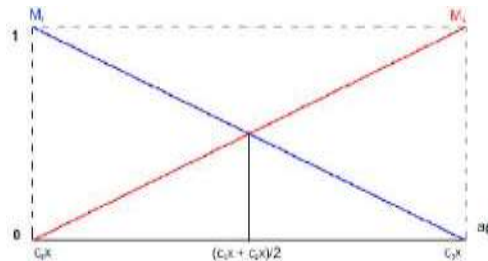


Рисунок 3.4 – Функція належності $a(t)$

Надалі, що розглядати нелінійну систему, необхідно подати у вигляді TS – моделі. Її можна уявити, як сукупність лінійних рівнянь, і мають вигляд «ЯКЩО... , ТО...», вони залежить від функціональної власності. Приклад:

ЯКЩО: $a_1(t) \in M_{i1}$ та ... та $a_p(t)$ відповідає M_{ip}

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

де $a_p(t)$ - вектор, що містить деякі зі змінних, де p - їх число;

i – кількість правил;

M_{ip} – нелінійний набір значень.

Тепер ми можемо вивести остаточний результат цієї нелінійної системи:

$$\dot{x}(t) = \sum_{i=1}^q h_1(a(t)) [A_i x(t) + D_i u(t)] \quad (3.21)$$

де $h_1(a(t)) [A_i x(t) + D_i u(t)]$ є ваговою функцією для i – числа.

Для прикладу підставимо вираз (3.12) нову нелінійну модель, яка компенсувала б помилки зміни вектора стану підводного робота – невизначеність вимірювання кутової і лінійної швидкостей, при маневруванні на глибині.

Тоді, отримуємо в цьому випадку:

$$x(t) = [V_x, V_y, \omega_z, \theta, \xi, \eta]^T, \quad (3.22)$$

де V_x і V_y - лінійна швидкість по осях x і y ,

ω_z – кутова швидкість,

θ – кут диферента,

ξ та η – координати центру тяжіння;

Далі складемо рівність виду:

$$u(t) = f(\tau),$$

де $\tau = \delta(t)$ – деякий керуючий вплив, що залежить від докладання різних сил, а також вплив перекладки рулів.

Тепер нам необхідно зробити низку математичних перетворень, та був і спрощень. Якщо записати модель руху підводного апарату, вона застосовуватиме такий вид:

$$\dot{x}(t) = \begin{bmatrix} \frac{a_1}{m_{11}} & 0 & \frac{m_{22}}{m_{11}} \cdot V_y & \frac{a_2}{m_{11}} & 0 & 0 \\ -\frac{m_{11}}{m_{22}} \cdot \omega_z & 0 & \frac{a_3}{m_{22}} & \frac{a_6}{m_{22}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{a_{10}}{m_{66}} & \frac{a_{11}}{m_{66}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ \cos \theta & -\sin \theta & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot x(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{a_8}{m_{22}} \\ \frac{a_{13}}{m_{66}} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \cdot u(t) \quad (3.23)$$

де m і a – масові та гідродинамічні коефіцієнти підводного апарату.

Тепер ми можемо створити модель руху і припустити, що параметри V_y і ω_z не лінійні і знаходяться в межах V_y при $\epsilon \in [-0.2; 0.2]$ та ω_z при $\epsilon \in [-0.1; 0.1]$.

Тепер, якщо враховувати вирази (3.19) (3.20) і (3.21), можна отримати функцію наступного виду:

$$V_y(t) = M_{11}(V_y(t)) \cdot 0,2 + M_{12}(V_y(t)) \cdot (-0,2) \quad (3.24)$$

$$\text{де } M_{11}(V_y(t)) + M_{12}(V_y(t)) = 1$$

Тоді отримаємо:

$$M_1(t) = \frac{0,1+\omega_z(t)}{0,2} \text{ та } M_2(t) = \frac{0,1-\omega_z(t)}{0,2}$$

Тепер можна скористатися TS-моделлю та сформулювати правила, які лінеаризують нелінійну модель що досліджуємо (3.19) [1,2]:

$$1) \text{ ЯКЩО: } V_y(t) = M_{11} \text{ і } \omega_z(t) = M_{21},$$

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

$$2) \text{ ЯКЩО: } V_y(t) = M_{11} \text{ і } \omega_z(t) = M_{22};$$

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

$$3) \text{ ЯКЩО: } V_y(t) = M_{12} \text{ і } \omega_z(t) = M_{21},$$

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

$$4) \text{ ЯКЩО: } V_y(t) = M_{12} \text{ і } \omega_z(t) = M_{22},$$

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

При цьому матриці A та D – елементи, які обчислюються, враховуючи формули (3.20) та (3.23). Таким чином, отримуємо, що нелінійна модель руху підводного апарату при маневруванні по глибині з двома різними параметрами - V_y і w_z в просторі є $[-0,2; 0,2] \times [-0,1; 0,1]$ повністю описується наступним виразом:

$$\dot{x}(t) = \sum_{i=1}^4 h_1(a(t)) [A_i x(t) + D_i u(t)] \quad (3.24)$$

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

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

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

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

У результаті застосування описаного підходу формується нелінійна модель руху, побудована на основі TS-моделі з параметрами, що змінюються в часі. Дана модель являє собою об'єднання набору відносно простих лінійних рівнянь, кожне з яких описує поведінку системи в окремій області її функціонування.

Керування в такій моделі реалізується за допомогою базового набору логічних правил типу «ЯКЩО – ТО», які відповідають локальним лінійним представленням нечітко визначених параметрів системи. Сукупність таких правил дозволяє адекватно апроксимувати нелінійну динаміку телекерованого безпілотного підводного апарата в широкому діапазоні режимів роботи.

Таким чином, TS-підхід забезпечує одночасне поєднання простоти лінійних моделей і гнучкості нечіткої логіки, що робить його ефективним інструментом для опису та керування складними підводними робототехнічними системами в умовах невизначеності та змінних зовнішніх впливів.

3.4 Моделювання

Для реалізації отриманої моделі управління необхідно скласти блок схему [7], складену в середовищі Mat LAB Simulink, рис.3.5.

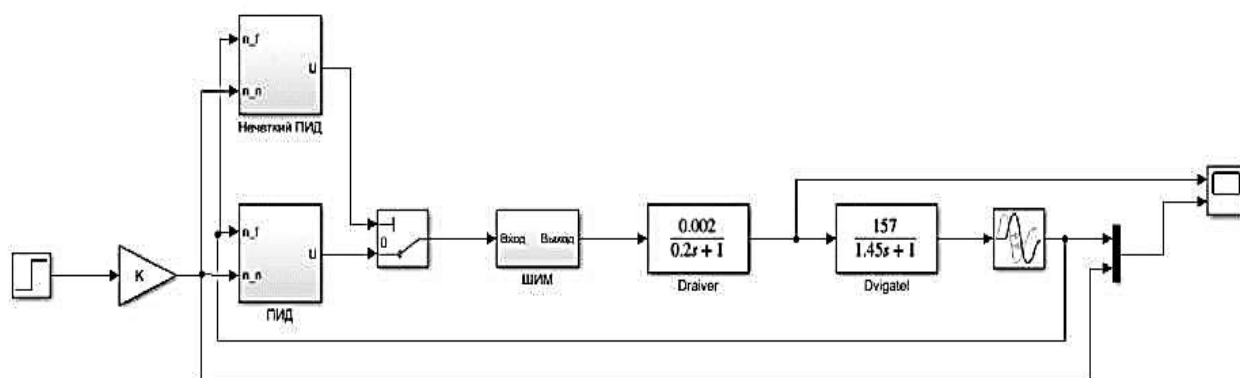


Рисунок 3.5 – Модель об'єкта керування

Модель ШИМ-блоку являє собою окрему функціональну підсистему, принцип роботи якої полягає у поетапному перетворенні вхідного сигналу. На першому етапі постійний вхідний сигнал надходить на інтегратор, де він перетворюється на лінійно змінну величину. Далі здійснюється формування логічного сигналу керування, за яким вихід інтегратора примусово скидається до початкового рівня, що дорівнює нулю.

У результаті на виході інтегратора формується пилкоподібний сигнал, який змінюється в діапазоні від 0 до 2000 з частотою 100 Гц. Даний сигнал

обчислюється на основі безперервного вхідного впливу та використовується для подальшої генерації широтно-імпульсної модуляції. У випадку, якщо значення сигналу керування є від'ємним, на вхід ШИМ-блоку передається значення 10, в іншому випадку – 0, що забезпечує коректну логіку керування виконавчим елементом.

У моделі ПІД-регулятора, зображений на рис. 3.6, передбачено спеціальний елемент, який відповідає за дискретизацію вхідних параметрів із заданою частотою. З фізичної точки зору цей процес можна інтерпретувати як інтервал часу, з яким система керування здійснює опитування вимірювальних датчиків. Саме цей інтервал визначає швидкість системи та її здатність адекватно реагувати на зміну стану об'єкта керування.

Слід також зазначити, що частота дискретизації, яка задається в структурі моделі ПІД-регулятора, не обов'язково збігається з внутрішньою частотою обчислень програмного середовища, в якому розв'язуються диференціальні рівняння. Така відмінність є конструктивною особливістю чисельного моделювання й повинна враховуватися під час аналізу стабільності та точності роботи системи автоматичного керування телекерованим безпілотним підводним апаратом.

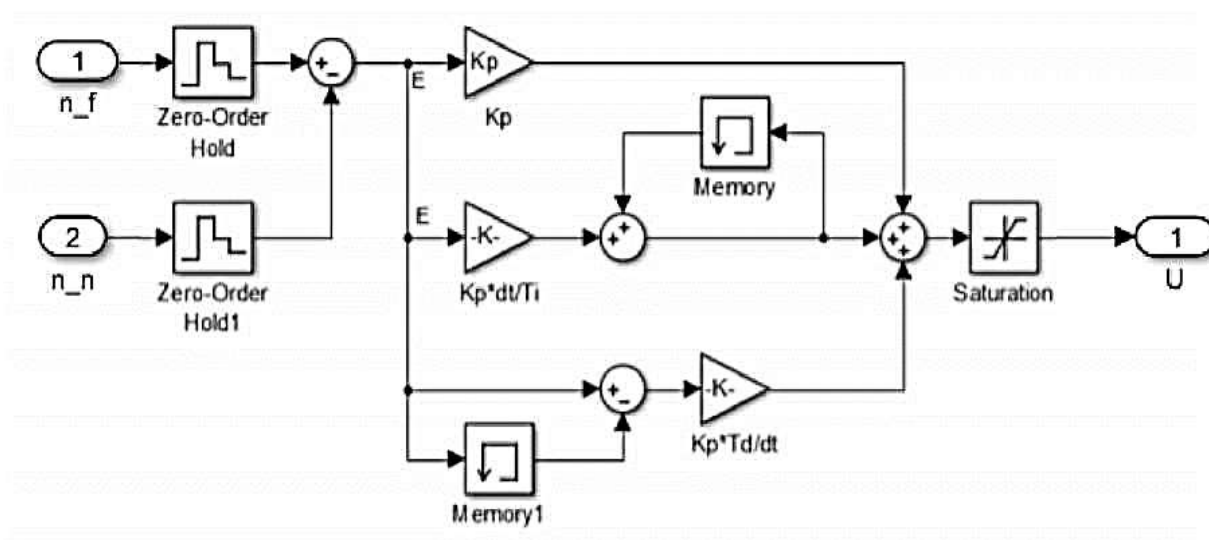


Рисунок 3.6 – Внутрішня структура ПІД-регулятора

Що стосується обмежень вихідного сигналу регулятора, то його робочий діапазон задається верхньою межею $U_{\max}=2500\text{об/хв}$ та нижньою межею $U_{\min}=100\text{ об/хв}$. Ці значення відповідають мінімально допустимим і максимальним режимам обертання лопатей рушійних двигунів, при яких забезпечується їх стабільна та безпечна робота.

Період дискретизації всієї системи керування прийнято рівним $0,1\text{ с}$, що визначає інтервал часу, з яким оновлюється обчислення сигналу керування. Така величина періоду дискретизації є компромісом між швидкодією системи та обчислювальним навантаженням.

Частота опитування вимірювальних датчиків не є сталою величиною і залежить від характеру перехідних процесів об'єкта керування. Чим швидше змінюється динамічний стан телекерованого безпілотного підводного апарата, тим меншим повинен бути інтервал між послідовними вимірюваннями, тобто тим частіше система повинна зчитувати дані з датчиків. Це дозволяє своєчасно формувати коригувальні впливи керування та підтримувати необхідну точність і стійкість процесу керування.

З аналізу рис. 3.7 видно, що пунктирною лінією позначено задане значення, яке визначається оператором, тоді як суцільною кривою відображено фактичний відгук об'єкта керування, до якого система автоматичного регулювання повинна привести апарат. Як можна спостерігати, отриманий процес керування є далеким не лише від ідеального, а й від прийнятного з точки зору стабільності та точності.

Наявні значні перерегулювання, затримки та коливання свідчать про те, що система в поточній конфігурації не забезпечує необхідної якості керування. У зв'язку з цим виникає потреба детально проаналізувати причини такої поведінки, зокрема дослідити вплив параметрів ПД-регулятора, характеристик об'єкта керування, обмежень виконавчих механізмів, а також дискретизації та зовнішніх збурень.

Подальший аналіз дозволить виявити ключові фактори, що негативно впливають на динамічні властивості системи, та обґрунтувати необхідні

					038.Б-26.00.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		67

коригувальні заходи для підвищення стійкості та точності керування телекерованим безпілотним підводним апаратом.

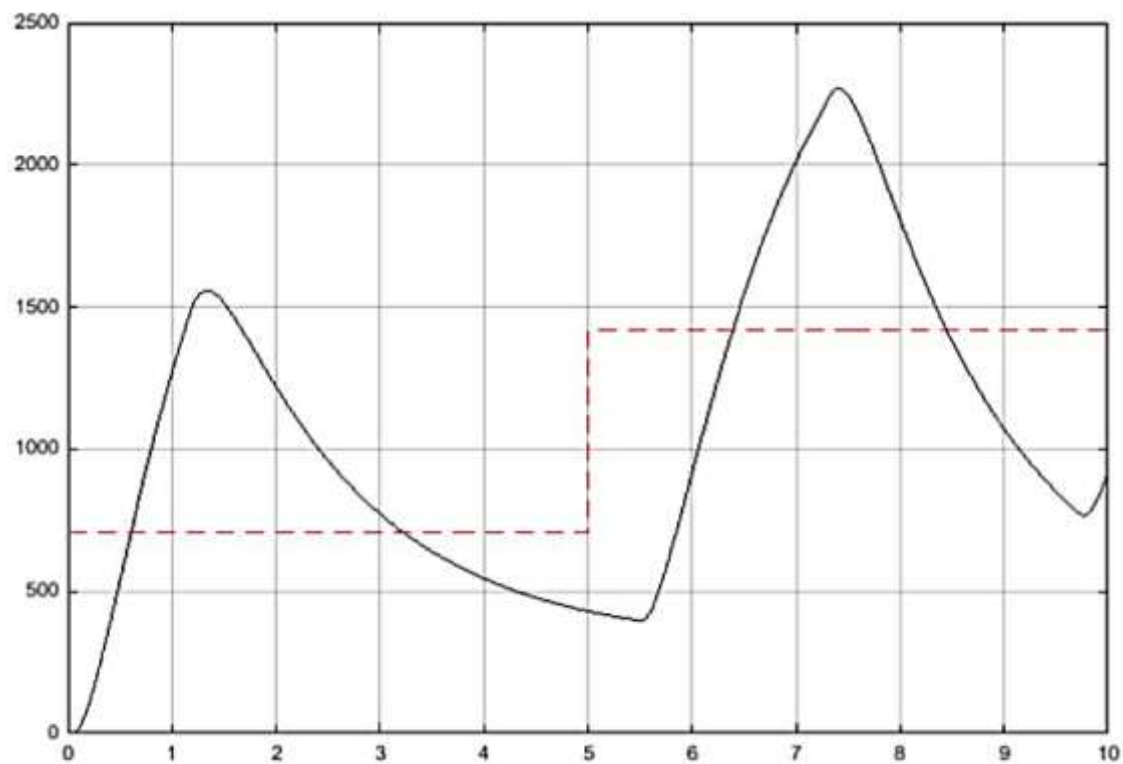


Рисунок 3.7 – Перехідний процес за частотою обертання ротора двигуна

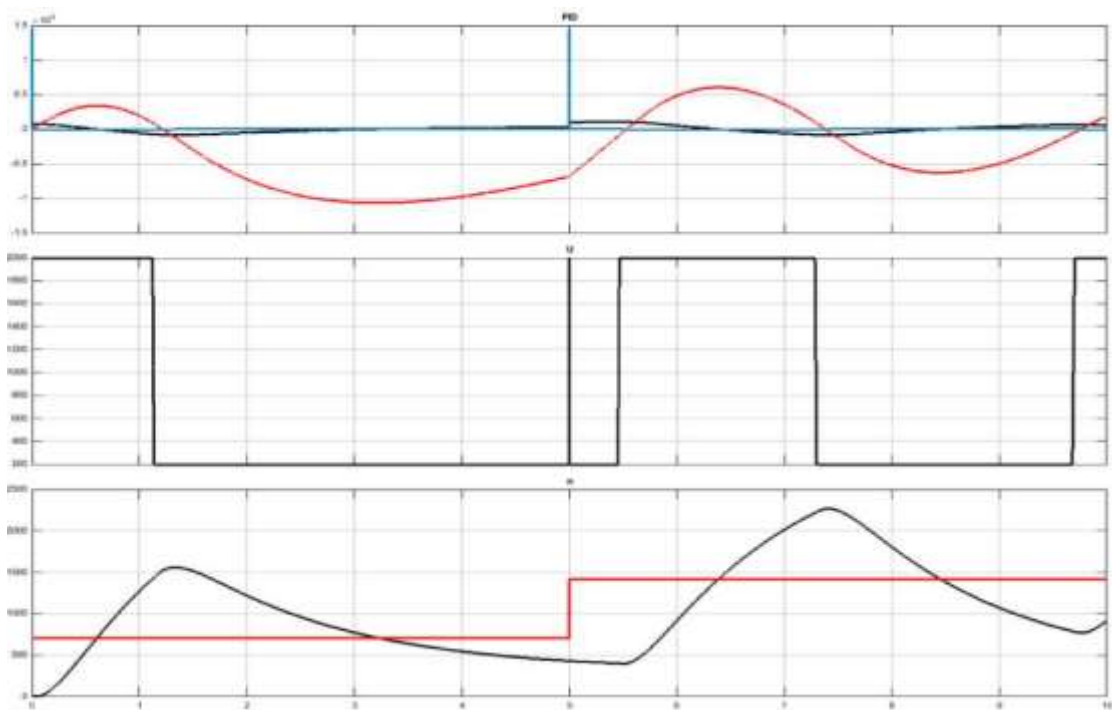


Рисунок 3.8 – Реакція системи на зовнішні збурення

На рис. 3.8 у верхній частині подано перехідні процеси, що відповідають окремим складовим ПД-регулятора. Пропорційна складова показана чорною лінією, інтегральна – червоною, а диференціальна – синьою. Аналіз цих кривих дозволяє оцінити внесок кожного з елементів регулятора у формування керівного впливу.

На середньому графіку наведено значення вихідного сигналу регулятора з урахуванням установлених обмежень на виході. Нижній графік відображає зміну частоти обертання ротора електродвигуна в часі. З аналізу середнього графіка видно, що домінуючий внесок у вихідний сигнал ПД-регулятора в даному режимі забезпечує саме інтегральна складова, яка відповідає за усунення сталої похибки.

У режимі усталеної роботи, а також за дії малих збурень, більшість систем із ПД-регуляторами можуть розглядатися як лінійні. Проте етап виходу системи на робочий режим у практичних умовах майже завжди потребує врахування нелінійностей типу обмеження (насичення). Такі нелінійності зумовлені природними фізичними межами виконавчих механізмів, зокрема максимально допустимою потужністю, граничною швидкістю та частотою обертання, допустимими кутами повороту та іншими технічними обмеженнями.

У випадку, коли система керування входить у режим насичення, контур регулювання фактично втрачає замкненість. Це пояснюється тим, що за подальшої зміни вхідної змінної елемента з обмеженням його вихідна величина залишається сталою, не реагуючи на сигнал керування. Як наслідок, ефективність регулювання знижується, що негативно позначається на динамічних характеристиках системи та якості керування телекерованим безпілотним підводним апаратом.

					038.Б-26.00.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		69

РОЗДІЛ 4

ОХОРОНА ПРАЦІ

4.1 Аналіз виробництва, безпеки праці та навколишнього середовища

Аналіз шкідливих і небезпечних факторів при роботі.

У процесі її виконання на робочому місці оператора можуть виникати певні небезпечні та шкідливі фактори, характерні для робіт, пов'язаних з використанням комп'ютерної та офісної техніки.

Основними потенційними небезпечними факторами є:

- пожежна безпека;
- ризик ураження електричним струмом;
- відсутність або недостатній рівень природного освітлення;
- підвищене зорове навантаження;
- несприятливі параметри мікроклімату.

Приміщення, у якому розміщено персональний комп'ютер та допоміжну офісну техніку, має площу 20 м². Об'єм приміщення визначається за формулою:

$$V=S \cdot h=20 \cdot 2,7=54 \text{ м}^3$$

У приміщенні забезпечено відповідні параметри температурного режиму та якості повітря, що створює належні умови для виконання розрахунково - проектних робіт.

Згідно з чинними санітарними нормами, мінімальна площа робочого місця з персональним комп'ютером для дорослих користувачів повинна становити не менше 6,0 м², а об'єм приміщення – не менше 20 м³. Таким чином, фактичні габаритні параметри приміщення повністю відповідають встановленим санітарно-гігієнічним вимогам.

Для оздоблення стін, стелі та покриття підлоги у приміщеннях, де розміщується обчислювальна техніка, мають застосовуватися матеріали, дозволені органами санітарно-епідеміологічного нагляду. Внутрішнє оздоблення повинно виконуватися з матеріалів, що забезпечують рівномірне

					038.Б-26.00.00.00.000.ПЗ	Арк.
						70
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

дифузне відбиття світлового потоку. Рекомендовані коефіцієнти відбиття становлять:

для стелі – 0,7–0,8;

для стін – 0,5–0,6;

для підлоги – 0,3–0,5.

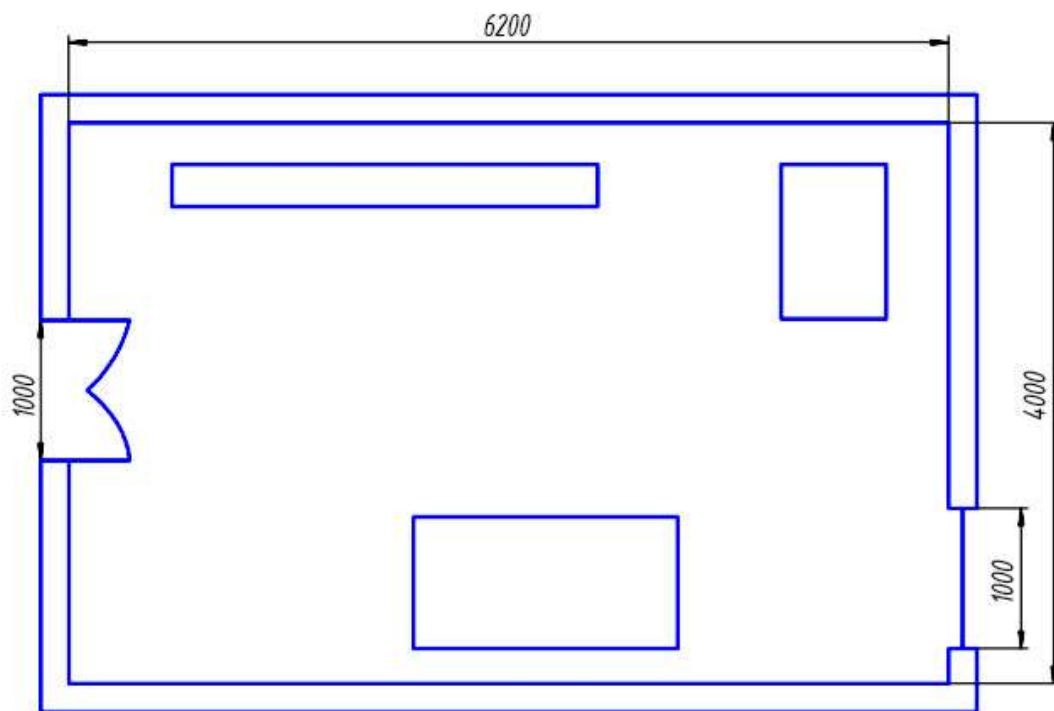


Рисунок 4.1 – Розміри приміщення

4.2 Мікроклімат

У даному приміщенні основний вид діяльності пов'язаний з тривалим використанням монітора та персонального комп'ютера, у зв'язку з чим воно оснащено системами, що забезпечують підтримання оптимальних параметрів мікроклімату для безпечної та комфортної роботи.

Для створення належних умов повітряного середовища використовується система вентиляції у поєднанні з регулярним провітрюванням. Вентиляційна система забезпечує своєчасне видалення нагрітого та забрудненого повітря з робочої зони, а також надходження свіжого зовнішнього повітря, що сприяє нормалізації мікрокліматичних показників.

Основні параметри мікроклімату, зокрема температура повітря, відносна вологість і швидкість його руху в зоні розташування робочого місця, повинні відповідати чинним санітарно-гігієнічним нормам. Окрім цього, важливим чинником комфортних умов праці є забезпечення оптимального іонного складу повітря, а саме збалансованого співвідношення позитивних і негативних аероіонів.

Таблиця 4.1– Основні параметри мікроклімату

Період року	Температура, °C			Відносна вологість, %	
	Оптимальна	Фактична		Оптимальна	Дійсна
		Max	Min		
Холодний	21 - 24	24	21	40 - 60	55
Теплий	23 - 28	28	24	40 - 60	43

У теплий період року середнє значення температури повітря в приміщенні становить 25 °C, а відносна вологість – 44 %. У холодний сезон зазначені показники змінюються і складають відповідно 23 °C та 55 %.

Аналіз отриманих даних свідчить, що параметри мікроклімату як у теплий, так і в холодний період року перебувають у межах оптимальних нормативних значень, що забезпечує сприятливі та комфортні умови для виконання робіт у даному приміщенні.

4.3 Освітлення

Недостатній рівень освітленості на робочому місці призводить до підвищеного зорового напруження, зниження концентрації уваги та швидкого настання втоми. Надмірна яскравість освітлення, у свою чергу, може спричиняти засліплення, подразнення й больові відчуття в очах. Нераціональне розміщення світильників створює тіні та відблиски на робочих поверхнях і екрані монітора, що негативно впливає на зорове сприйняття інформації та може дезорієнтувати працівника.

					038.Б-26.00.00.00.000.ПЗ	Арк.
						72
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Зазначені фактори підвищують ризик виникнення нещасних випадків і професійних захворювань, у зв'язку з чим правильний розрахунок системи освітлення, обґрунтований вибір типу світильників, їх кількості та раціонального розташування є надзвичайно важливими умовами безпечної праці.

Штучне освітлення в приміщеннях, де використовується персональний комп'ютер, повинно забезпечувати рівномірний загальний світловий потік. У разі виконання робіт, пов'язаних переважно з обробленням документів, доцільно застосовувати додаткове місцеве освітлення, призначене для безпосереднього освітлення робочої зони.

Освітленість на поверхні робочого столу в зоні розміщення документації має становити 300–500 лк. При цьому світильники не повинні створювати відблисків на екрані монітора, а яскравість зображення на екрані не має перевищувати 300 лк. Для організації загального штучного освітлення рекомендується використовувати люмінесцентні лампи типу ЛБ або компактні люмінесцентні джерела світла, тоді як у місцевих світильниках допускається застосування ламп розжарювання, у тому числі галогенних.

У досліджуваному приміщенні передбачено комбіновану систему освітлення, що поєднує загальне та місцеве штучне освітлення з природним бічним освітленням. Штучне освітлення реалізується за рахунок електричних джерел світла – ламп розжарювання. З урахуванням наведених умов виконується розрахунок освітленості приміщення.

Розрахунок проводиться для кімнати площею 26 м², шириною 4,5 м і висотою 2,7 м. Для визначення необхідної освітленості застосовується метод світлового потоку, який дозволяє встановити потрібний сумарний світловий потік для даного приміщення та порівняти його з нормативними значеннями згідно з відповідною розрахунковою формулою:

$$E_{\text{еф}} = \frac{F_{\text{л}} \cdot N \cdot n \cdot \eta}{S \cdot k_3 \cdot z}$$

де $E_{\text{еф}}$ – світловий потік, Лк;

					038.Б-26.00.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		73

E – нормована мінімальна освітленість, Лк.

Роботу інженера, відповідно таблиці, можна віднести до розряду точних робіт, отже, мінімальна освітленість буде $E = 300\text{лк}$;

S – площа освітлюваного приміщення (у нашому випадку $S = 20\text{м}^2$);

z – відношення середньої освітленості до мінімальної (звичайно приймається рівним 1,1 ... 1,2, нехай $Z = 1,1$);

Коефіцієнт запасу (k_3) враховує зменшення світлового потоку лампи через забруднення світильників під час експлуатації. Його значення залежить від типу приміщення та характеру роботи, а у нашому випадку становить ($K = 1,5$).

N – кількість світильників;

n – кількість ламп у кожному світильнику;

η – коефіцієнт використання, що визначається як відношення світлового потоку, що падає на розрахункову поверхню, до сумарного потоку всіх ламп. Його значення залежить від характеристик світильника, розмірів приміщення та кольору оздоблення.

Коефіцієнти відбиття поверхонь: Стеля свіжопобілена: ($\rho_{\text{сл}} = 70\%$);

Стіни світло-сірі: ($\rho_{\text{сн}} = 50\%$);

Підлога паркетна: ($\rho_{\text{п}} = 30\%$).

Значення η визначається за таблицею коефіцієнтів використання світильників. Для цього спочатку розраховуємо індекс приміщення за формулою:

$$I = \frac{S}{h(a+b)} = \frac{20}{2.7(4+7.5)} = 0.64$$

де S – площа приміщення, h – висота, a та b – ширина та довжина відповідно.

Розрахунок цього показника дозволяє визначити ефективність світлового потоку у приміщенні.

Підставимо вказані значення для визначення світлового потоку:

					038.Б-26.00.00.00.000.ПЗ	Арк.
						74
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$E_{\text{ef}} = \frac{3700 \cdot 3 \cdot 3 \cdot 0,38}{20 \cdot 1,5 \cdot 1} = 337,4 \text{лк}$$

Отже, освітленість приміщення не достатня, саме тому використовується, ще штучне освітлення, а саме освітленість екрану відповідає нормам.

4.4 Електробезпека

Електробезпека представляє собою сукупність організаційних і технічних заходів, спрямованих на запобігання шкідливому впливу на людину електричного струму, електромагнітних полів, електричної дуги та проявів статичної електрики.

У приміщенні експлуатуються та обслуговуються два персональні комп'ютери. У доступному та позначеному місці встановлено аварійний резервний вимикач і електрощит із запобіжним апаратом, що забезпечує повне знеструмлення приміщення, за винятком системи освітлення. Електричний щит підключений до заземлювальної шини, а усі розетки лабораторії оснащені захисним зануленням, що підвищує рівень електробезпеки.

Кожен персональний комп'ютер під'єднаний до електромережі через окрему розетку з індивідуальним запобіжником, що запобігає перевантаженню лінії живлення. Для підключення переносних електроприладів застосовуються гнучкі кабелі з якісною ізоляцією та додатковим захисним елементом. Прокладання електропроводів від приладів до джерел живлення здійснюється найкоротшим і безпечним шляхом, що виключає можливість їх пошкодження або заплутування навколо меблів і обладнання.

4.5 Пожежна безпека

Приміщення, у яких експлуатуються персональні комп'ютери, відповідно до чинної класифікації належать до пожежонебезпечних і відносяться до категорії В. Такі приміщення повинні відповідати встановленим

					038.Б-26.00.00.00.000.ПЗ	Арк.
						75
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

вимогам щодо попередження та ліквідації пожеж, а також бути забезпечені засобами зв'язку та системою пожежної сигналізації.

У лабораторії використовуються меблі, виготовлені з МДФ, дверні та віконні блоки виконані з металопластикових конструкцій, а корпуси комп'ютерної техніки та допоміжного обладнання – з металу і полімерних матеріалів. З урахуванням властивостей зазначених матеріалів та їх пожежонебезпечності, приміщення за вибухо- та пожежною небезпекою також характеризується як таке, що належить до категорії В.

Згідно з вимогами ДБН В.2.2-9:2018, будівля має II ступінь вогнестійкості, що передбачає відповідність основних будівельних конструкцій таким граничним показникам вогнестійкості:

- несучі стіни, колони і стіни сходових кліток – не менше 2 год;
- сходові клітки, сходи, балки та марші – не менше 1 год;
- зовнішні стіни з навісних панелей – не менше 0,25 год;
- внутрішні та зовнішні перегородки – не менше 0,25 год;
- плити та настили міжповерхових перекриттів – не менше 0,75 год;
- плити, настили та інші несучі елементи – не менше 0,25 год.

Розрахунковий час, необхідний для евакуації людей з приміщення, становить 40 секунд, що відповідає вимогам пожежної безпеки та забезпечує можливість оперативного й організованого виходу персоналу без виникнення паніки.

Для локалізації та гасіння можливих осередків загоряння в приміщенні рекомендовано використання вуглекислотних вогнегасників типу ВВК-1,4 (ОУ-2) у кількості 4шт, що є достатнім з огляду на площу приміщення, характер обладнання та клас можливих пожеж.

					038.Б-26.00.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		76

ВИСНОВКИ ТА ПРОПОЗИЦІЇ

У процесі виконання даної роботи було розроблено телекерований безпілотний підводний апарат легкого класу, призначений для виконання оглядових і дослідницьких робіт. Апарат здатний здійснювати занурення на глибину до 150 м, рухатися зі швидкістю від 0,1 до 1 м/с та має достатньо високі динамічні характеристики. Маневреність і просторову керованість забезпечує використання восьми рушійних модулів і системи керування на основі пілотного джойстика, що дозволяє реалізувати багатовекторний рух у тривимірному просторі.

У межах роботи було виконано порівняльний аналіз сучасних телекерованих безпілотних підводних апаратів, за результатами якого визначено їхні ключові конструктивні та функціональні особливості, а також виявлено основні переваги й обмеження. Отримані результати стали основою для вибору структури розроблюваного апарата та прийняття технічних рішень, що відповідають сучасному рівню розвитку підводної робототехніки.

Окрему увагу приділено питанням ефективності системи керування, яка повинна поєднувати високу точність позиціонування з простотою використання для оператора. Застосування пілотного джойстика, що широко використовується в авіаційних симуляторах, дозволяє підвищити ергономічність керування та оцінити практичні переваги такого підходу для підводних робототехнічних комплексів.

У межах проекту також було спроектовано рушійний вузол підводного апарата, що складається з чотирьох основних конструктивних елементів, виготовлених методом 3D-друку. Ключовими компонентами вузла є електродвигун і гребний гвинт, які були детально розраховані. Гребний гвинт змодельовано в середовищі SolidWorks, а електродвигун підібрано з урахуванням гідродинамічних і енергетичних характеристик системи.

У перспективі передбачається практична реалізація розробленого апарата, проведення натурних випробувань та подальша інтеграція

					038.Б-26.00.00.00.000.ПЗ	Арк.
						77
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

телекерованого безпілотного підводного апарата у виробничі й дослідницькі процеси, що відкриває можливості його застосування в промисловості, наукових дослідженнях та інженерних обстеженнях.

					038.Б-26.00.00.00.000.ПЗ	Арк.
						78
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Foreign Spies Target Underwater Drone Fleet, Military Spooks Say. ABC News. 27 жовтня 2011. <https://abcnews.go.com/Blotter/underwater-drone-tech-target-espionage-military-spooks/story?id=14826316>
2. He, Ying; Wang, Dao Bo; Ali, Zain Anwar . A review of different designs and control models of remotely operated underwater vehicle. Measurement and Control 53 (9–10): 1561–1570. doi:10.1177/0020294020952483.
3. Autonomous Underwater Vehicles | AUV Technology | Underwater Gliders. Unmanned Systems Technology <https://www.unmannedsystemstechnology.com/expo/autonomous-underwater-vehicles-auv/>
4. Autonomous Underwater Vehicle - an overview | ScienceDirect Topics. <https://www.sciencedirect.com/topics/earth-and-planetary-sciences/autonomous-underwater-vehicle>.
5. ПУЕ 2021 [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://enext.ua/uk/press/articles/PUE-2021-Razdel-pervyy-Pravila-ustroystvaelektroustanovok/>
6. Підводні Апарати R7 з Дистанційним Управлінням [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://sundries.com.ua/belhiia-peredastukraini-pidvodni-aparaty-r7-z-dystantsiinym-upravlinniam/>.
7. Підводний дрон Chasing M2 Combo [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://elitecopter.com.ua/podvodnyj-dron-chasing-m2-combo>
8. Підводний апарат “SeaFox” [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://invoen.ru/vvt/neobitaemye-podvodnye-apparaty/>.
9. Дистанційно керований підводний апарат Lynx [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://www.demetra5.kiev.ua/ru/catalog/seaeye/lynx>.
10. Мікродвигун [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://arduino.ua/ru/prod3478-mikromotor-s-redyktorom-6v-300-rpm>

					<i>038.Б–26.00.00.00.000.ПЗ</i>	Арк.
						79
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

11. ДБН В.2.2-9:2018 [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: https://dbn.co.ua/publ/konstruktivni_kharakteristiki_vid_stupenja_vognestijkosti/161-0-550.
12. Проектування пакувального обладнання із мехатронних модулів / М.В.Якимчук, О.М.Гавва, А.П.Беспалько та ін. / За ред. О.М.Гавви. – К.: Сталь, 2017. – 515 с.
13. Безпека життєдіяльності та цивільний захист [Електронний ресурс]: підручник для студ. спеціальностей з природничих, соціально-гуманітарних наук та інженерно-комунікаційних технологій / О. Г. Левченко, О. В. Землянська, Н. А. Праховнік, В. В. Зацарний; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові данні (1 файл: 10,2 Мбайт). – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 267 с.
14. Винокурова Л.Е. Основи охорони праці - К.: Вікторія, 2002, 192с.

					038.Б-26.00.00.00.000.ПЗ	Арк.
						80
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ДОДАТКИ