



Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Автоматики і комп'ютеризованих технологій

Кафедра Комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки

Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)

Спеціальність 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології  
(код і повна назва)

Тип програми освітньо-професійна

Освітня програма Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології  
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри \_\_\_\_\_  
(підпис)

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20 25 р.

**ЗАВДАННЯ**  
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

здобувачеві Котенко Володимир Анатолійовичу  
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розроблення макету надводного робота для збору та обробки даних у реальному часі

затверджена наказом університету від 19 травня 2025 р. № 390Ст

2. Термін подання здобувачем роботи до екзаменаційної комісії 23 червня 2025 р.

3. Вихідні дані до роботи 3.1 Мови програмування – C++, HTML, CSS, JavaScript

3.2 Робот з 2 двигунами

3.3 Ультразвуковий датчик

3.4 Ехолот

3.5 Серводвигун

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

4.1 Вступ

4.2 Аналіз сучасного стану розробок в області робототехніки

4.3 Вибір та обґрунтування технічних засобів для створення робота

4.4 Розроблення макету надводного робота для збору та обробки даних

4.5 Висновки



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

12.06.2025



Володимир КОТЕНКО

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 84 с., 42 рис., 4 табл., 70 джерел за переліком посилань, 4 додатка

ВЕБ-ІНТЕРФЕЙС, ВЕБСЕРВЕР, ВІДЕОПОТІК, ВОДНЕ СЕРЕДОВИЩЕ, ДАТЧИКИ, ЗБІР ДАНИХ, КАТАМАРАННА КОНСТРУКЦІЯ, НАДВОДНИЙ РОБОТ, ОБРОБКА ДАНИХ

Об'єкт розробки – процеси збору, обробки та передавання даних у режимі реального часу за допомогою мобільних роботизованих систем, що функціонують у надводному середовищі.

Предмет розробки – технічні та програмні засоби для створення макету надводного робота з функцією збору і передавання даних у режимі реального часу, зокрема апаратна архітектура, алгоритми керування, засоби зв'язку та інтерфейс користувача.

Мета роботи – підвищення ефективності пересування надводного мобільного робота, а також обробки та передавання даних у реальному часі за допомогою сучасних програмно-технічних засобів.

У роботі проаналізовано сучасні розробки в галузі мобільної робототехніки, зокрема надводних роботів. Обґрунтовано вибір компонентів, розроблено структурну та електричну схеми, алгоритм роботи й програмне забезпечення з вебінтерфейсом для керування рухом, передавання відео та даних із датчиків. Створено макет робота та проведено його тестування. У проєкті використано ESP32, ESP32-CAM, ультразвукові датчики, ехолот, електродвигуни, сервоприводи, Arduino IDE, C++, HTML, CSS і JavaScript.

Розробка сприяє досягненню Цілей сталого розвитку ООН, зокрема в частині захисту водних ресурсів (Ціль 6 та Ціль 14), розвитку інновацій (Ціль 9) та відповідальному використанню ресурсів (Ціль 12).

## ABSTRACT

Explanatory Note: 84 pages, 42 figures, 4 tables, 70 sources, 4 appendices.

WEB INTERFACE, WEB SERVER, VIDEO STREAM, AQUATIC ENVIRONMENT, SENSORS, DATA COLLECTION, CATAMARAN DESIGN, UNMANNED SURFACE VEHICLE, DATA PROCESSING

The object of development is the processes of real-time data collection, processing, and transmission using mobile robotic systems operating in a surface environment.

The subject of development is the hardware and software tools for creating a prototype of an unmanned surface vehicle with real-time data collection and transmission capabilities, specifically its hardware architecture, control algorithms, communication tools, and user interface.

The purpose of the work is to improve the locomotion efficiency of the unmanned surface mobile robot, as well as the real-time processing and transmission of data, utilizing modern software and hardware.

This work analyzes current developments in mobile robotics, particularly in unmanned surface vehicles. The selection of components is justified, and structural and electrical diagrams, an operation algorithm, and software with a web interface were developed for motion control, video transmission, and sensor data acquisition. A robot prototype was created and tested. The project utilized ESP32, ESP32-CAM, ultrasonic sensors, an echo sounder, electric motors, servo drives, Arduino IDE, C++, HTML, CSS, and JavaScript.

This development contributes to achieving the UN Sustainable Development Goals, particularly concerning the protection of water resources (Goals 6 and 14), fostering innovation (Goal 9), and responsible consumption and production (Goal 12).

## ЗМІСТ

Перелік скорочень .....	8
Вступ.....	9
1 Аналіз сучасного стану розробок в області робототехніки .....	11
1.1 Типи сучасних мобільних роботів .....	11
1.2 Переваги та недоліки надводних роботів .....	16
1.3 Аналіз аналогічних конструкцій.....	18
1.4 Збір та обробка даних за допомогою датчиків.....	24
2 Вибір та обґрунтування технічних засобів для створення робота.....	27
2.1 Вибір компонентів робота .....	27
2.2 Структурна схема робота .....	37
2.3 Схема підключення компонентів робота.....	39
2.4 Розрахунок часу автономної роботи надводного робота.....	41
2.5 Комп'ютерне моделювання системи автоматичного управління .....	43
3 Розроблення макету надводного робота для збору та обробки даних .....	48
3.1 Блок-схема алгоритму роботи програми .....	48
3.2 Створення конструкції робота .....	51
3.3 Розроблення програми керування .....	58
3.4 Результати роботи робота.....	67
3.5 Охорона праці .....	73
Висновки .....	75
Перелік джерел посилання .....	76
Додаток А Апробація результатів роботи .....	85
Додаток Б Програмний код для ESP32-CAM.....	90
Додаток В Програмний код для ESP32 DevKit V1 .....	104
Додаток Г Демонстраційний матеріал .....	110

## ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

МР – мобільний робот;

ПІД – пропорціонально-інтегрально-диференціальний;

ШІМ – широтно-імпульсна модуляція;

BMS – Battery Management System;

DC – Direct Current.

## ВСТУП

Світовий океан, річки, озера та інші водні об'єкти залишаються не лише джерелами життя на планеті, а й ключовими факторами економічного розвитку, транспортного сполучення, енергетики, харчової промисловості та екологічного балансу. Водночас водне середовище є одним з найменш досліджених і найдинамічніших компонентів глобальної екосистеми. Сучасні виклики, пов'язані зі зміною клімату, забрудненням водою, зникненням біорізноманіття та потребою в моніторингу природних ресурсів, вимагають новітніх підходів до збору та аналізу інформації про стан водних об'єктів.

У світовій науково-технічній практиці спостерігається активний розвиток робототехнічних систем для дослідження водного середовища. Особливе місце серед них займають надводні автономні або дистанційно керовані роботи, здатні здійснювати моніторинг, збір даних, картографування, виконувати батиметричні вимірювання, а також підтримувати зв'язок з іншими платформами. Застосування таких роботизованих систем значно підвищує ефективність і точність екологічного моніторингу, знижує вартість досліджень та дає змогу безпечно здійснювати роботи у важкодоступних або небезпечних місцях, мінімізуючи ризики для людини.

Також надводні роботи все частіше застосовуються у сфері безпеки та оборони для розвідки, патрулювання, виявлення й нейтралізації мін, боротьби з піратством, доставки вантажів у прибережні райони, а також ураження надводних цілей. Таке широке коло можливостей свідчить про зростаючий потенціал надводних роботів, як ефективних і сучасних високотехнологічних рішень для вирішення різноманітних завдань.

Актуальність теми зумовлена потребою у створенні ефективних, адаптивних і економічно доцільних технічних засобів для вивчення, моніторингу та охорони водного середовища. Зростаюча кількість екологічних та безпекових викликів вимагає оперативного збору достовірних даних у

реальному часі та можливості виконання завдань у складних або ризикованих умовах.

Метою роботи є підвищення ефективності пересування надводного мобільного робота, а також обробки та передавання даних у реальному часі за допомогою сучасних програмно-технічних засобів.

Об'єкт розробки – процеси збору, обробки та передавання даних у режимі реального часу за допомогою мобільних роботизованих систем, що функціонують у надводному середовищі.

Предмет розробки – технічні та програмні засоби для створення макету надводного робота з функцією збору і передавання даних у режимі реального часу, зокрема апаратна архітектура, алгоритми керування, засоби зв'язку та інтерфейс користувача.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- дослідити типи мобільних роботів та особливості надводних платформ;
- проаналізувати аналогічні конструкції та виявити їх переваги й недоліки;
- розглянути типи датчиків, що використовуються на надводних роботах, та їх призначення;
- здійснити вибір і обґрунтування технічних компонентів робота;
- розробити структурну схему робота;
- розробити схему підключення компонентів та алгоритм роботи програми;
- розробити програмне забезпечення для керування роботом;
- створити макет надводного робота та провести його тестування;
- оформити кваліфікаційну роботу згідно [1] та [2].

Дана кваліфікаційна робота пройшла апробацію у журналі ADED-2025 (1) [3].

# 1 АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ РОЗРОБОК В ОБЛАСТІ РОБОТОТЕХНІКИ

## 1.1 Типи сучасних мобільних роботів

З стрімким розвитком розв'язком інноваційних технологій, зростанням попиту на автоматизацію, мобільні роботи стали відігравати дедалі важливу роль у різних сферах сучасної людської діяльності. Завдяки здатності пересуватись і працювати в різних умовах навколишнього середовища, мобільні роботи стали незамінними помічниками у вирішенні багатьох завдань. Їх розвиток відкриває нові можливості для автоматизації, економії ресурсів та підвищення якості життя людей.

Мобільний робот (МР) – це автономна або частково автономна роботизована система, здатна використовувати різні сенсори й технології для розпізнавання навколишнього середовища та пересуватися в просторі для виконання різноманітних завдань [4-6]. Розробка мобільних робототехнічних систем охоплює широкий спектр середовищ функціонування від наземних платформ, призначених для руху по різних твердих поверхнях, до спеціалізованих конструкцій, здатних переміщуватись у повітряному просторі або функціонувати у водному середовищі [6].

Через велику різноманітність мобільних роботів існують різні ознаки, за якими їх можна класифікувати. Кожна з них дозволяє розглядати роботів з певного боку, враховуючи їх функціональні можливості та умови експлуатації. Основним параметром класифікації МР є тип середовища, в якому вони функціонують (рис. 1.1) [7]. Щоб краще зрозуміти особливості різних середовищ функціонування мобільних роботів, нижче подано їх коротку характеристику.

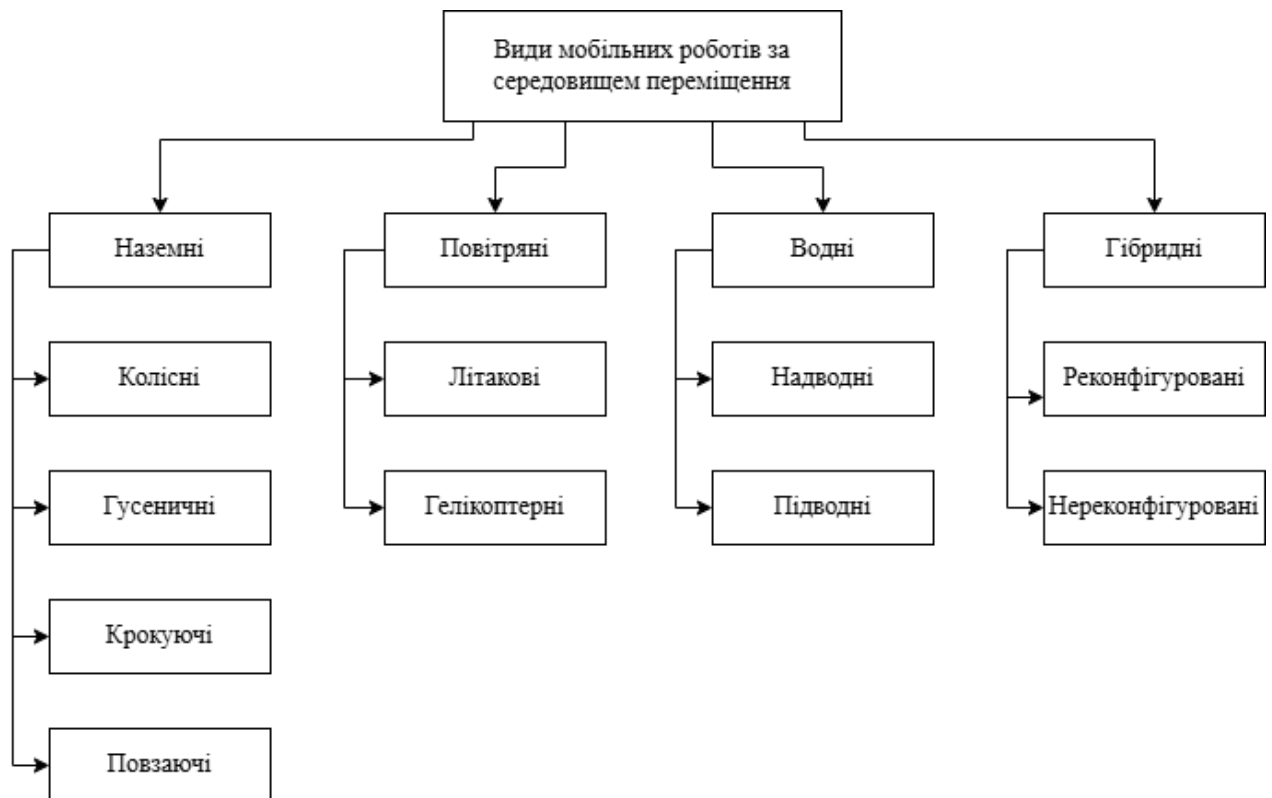
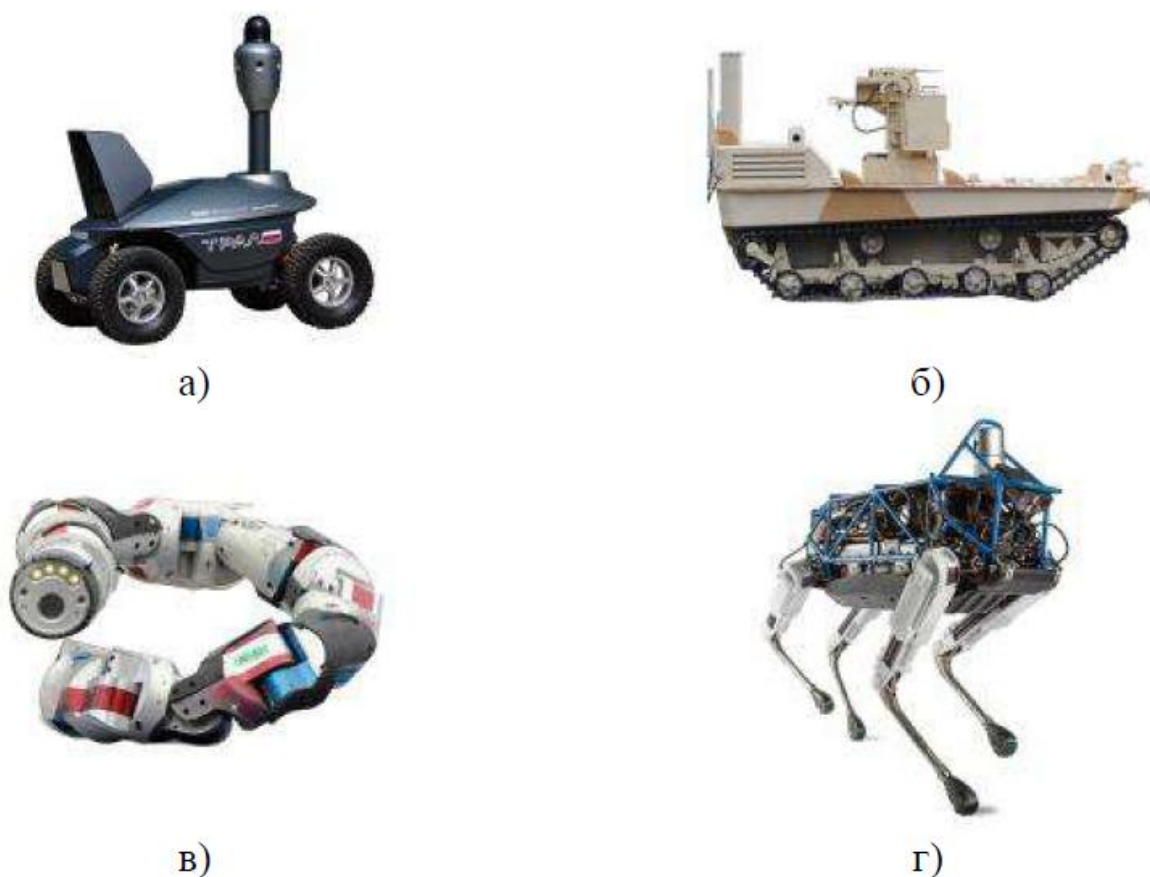


Рисунок 1.1 – Класифікація МР за середовищем функціонування

Першим та найпоширенішим видом МР є наземні, які переміщуються за рахунок взаємодії з твердою поверхнею, по якій рухаються [8]. Їх широка популярність зумовлена тим, що саме на суші зосереджено найбільшу кількість різноманітної роботи, яка потребує автоматизації, починаючи від сільського господарства, логістики та закінчуючи військовою справою чи рятувальними операціями [9-12]. Тому і роботів, орієнтованих на виконання цих завдань, було створено багато видів. Вони в залежності від функціонального призначення та умов експлуатації здатні пересуватися за допомогою коліс, рухатися на гусеницях, ходити як люди чи тварини, або повзати, подібно до змій [11,13] (рис. 1.2).



а) колісний тип; б) гусеничний тип; в) повзаючий тип; г) крокуючий тип

Рисунок 1.2 – Приклади наземних роботів [6]

Наступним видом МР після наземних є повітряні [14]. До цієї групи належать усі роботи, які здатні до польоту. Вони можуть пересуватись у повітрі різними способами – за принципом літака (рис. 1.3, а) або за принципом гелікоптера (рис. 1.3, б). Повітряні роботи, що використовують гвинти, часто називають коптерами (від англійського «copter» – гелікоптер) [6]. Вони застосовуються у різноманітних сферах людської діяльності, а саме у точному землеробстві, у адресній доставці медикаментів, моніторингу та аеророзвідці та навіть у пасажирських перевезеннях, тощо [15-18].



а)



б)

а) літакового типу; б) гелікоптерного типу

Рисунок 1.3 – Приклади повітряних роботів [19-20]

Наступним видом МР після повітряних є водні. Вони призначені для руху по водній поверхні або під водою. До першої групи належать автоматизовані човни та кораблі (рис. 1.4, а), а до другої підводні апарати, такі як субмарини чи батискафи (рис. 1.4, б). Дані роботи мають більш вузьку спеціалізацію та є досить рідкими, ніж наземні чи повітряні роботи. Така рідкість обумовлюється вузько направленими завданнями, які можуть виконувати дані апарати [6, 14].

Надводні роботи можуть застосовуватись в дослідженні водних об'єктів, екологічному моніторингу, оборонних цілях та рятувальних операціях [21]. Крім того, такі апарати дедалі активніше застосовуються в водних перевезеннях, рибальському промислі, природоохоронній діяльності та забезпеченні морського права [22].

Підводні роботи спочатку використовувалися переважно у військових цілях, зокрема для виявлення торпед і мін. З часом їх функціональність суттєво розширилася. Нині дистанційно керовані підводні апарати активно застосовуються в наукових дослідженнях, технічному обслуговуванні підводних об'єктів та під час рятувальних місій [23].



а)

б)

а) надводний тип; б) підводний тип

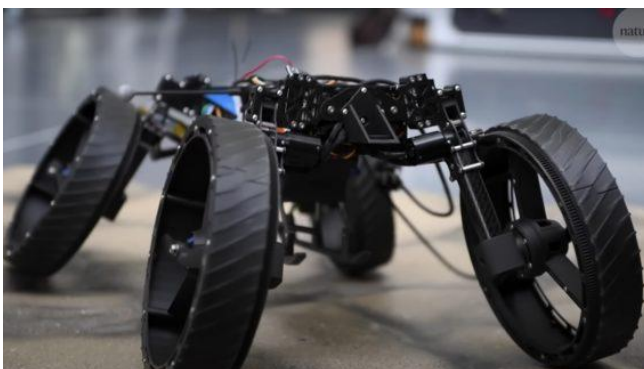
Рисунок 1.4 – Приклади водних роботів [6, 24]

Крім наземних, повітряних та водних МР ще слід виділити гібридних роботів (рис. 1.5). Даний тип роботів являє собою поєднання технічних рішень, притаманних розглянутим вище типам МР, а саме вирізняються здатністю до функціонування в двох або більше режимах пересування.

Цей тип роботів, який іноді називають мультимодальним, можна розділити на дві групи:

- реконфігуровані мультимодальні роботи (рис. 1.5, а), у яких два або більше способи переміщення реалізуються за допомогою одного і того ж мехатронного механізму;

- нереконфігуровані мультимодальні роботи (рис. 1.5 б), у яких способи переміщення незалежні один від одного [25].



а)



б)

а) реконфігурований тип; б) нереконфігурований тип

Рисунок 1.5 – Приклади гібридних роботів [25-26]

Гібридні роботи знаходять застосування для вирішення складних задач у різних середовищах, де один тип переміщення недостатній, зокрема при дослідженні археологічних зон, подоланні різноманітних перешкод та роботі на поверхнях різного типу [25].

## 1.2 Переваги та недоліки надводних роботів

Сучасні надводні роботи (дрони) займають ключову роль у різних галузях від військової та наукової до промислової та цивільної. Їх розвиток відкрив нові можливості для наукових досліджень водних об'єктів, моніторингу та забезпеченню морської безпеки, виконання складних операцій у важкодоступних районах, а також значно підвищив ефективність багатьох видів водної діяльності.

У цьому підрозділі буде розглянуто основні переваги й недоліки надводних роботів, які необхідно враховувати під час їх проектування та експлуатації.

Однією з ключових переваг надводних роботів є можливість виконання небезпечних завдань без участі екіпажу. Наприклад, під час проведення розмінування водних об'єктів, патрулювання прибережених зон або роботи у несприятливих метеоумовах, надводні роботи дозволяють уникнути загроз для життя та здоров'я людини. Крім того, дані апарати можна використовувати для ураження цілей на воді, що є актуальним в умовах сучасної війни [27].

Використання надводних роботів дозволяє суттєво знизити економічні витрати. Відсутність екіпажу означає, що немає потреби в життєзабезпеченні на борту, зменшуються витрати на паливо, обслуговування обладнання та самого апарата, а також на заробітну плату персоналу [28].

Використання надводних роботів дає можливість проводити тривалі завдання, адже вони здатні залишатися в морі протягом тривалого часу, значно довше, ніж судна з екіпажем. Відсутність людського фактору, а саме

необхідність відпочинку, прийому їжі, тощо, дозволяє проводити безперервні операції протягом днів, тижнів і навіть місяців. Крім того, ці апарати можуть працювати в більш суворих погодних умовах, ніж звичайні судна, оскільки не треба враховувати потреби екіпажу [29].

Без необхідності розміщення екіпажу та систем життєзабезпечення, надводні роботи можуть мати більш обтічну та легшу конструкцію, що робить їх швидшими, маневренішими та компактнішими. Дані рішення дозволяють легше керувати надводними роботами та діставатись важкодоступних ділянок [30].

Як і будь-які інші роботи, надводні мають також свої недоліки. Першим і з них є те, що надводні апарати постійно піддаються впливу вологи, солоної й прісної води та різких змін температури, що створює серйозні вимоги до захисту електронних та механічних компонентів. Корозія від солоної або прісної води може швидко пошкодити незахищені компоненти, значно скорочуючи термін експлуатації всієї системи. Забезпечення належного водозахисту підвищує вартість виробництва та ускладнює конструкцію. Крім того, необхідність герметизації всіх систем ускладнює оперативний ремонт та планове обслуговування, що може призвести до тривалих простоїв при виникненні навіть незначних несправностей [31].

Іншим недоліком надводних роботів є проблеми з надійністю зв'язку та навігації у разі кібератак або радіоелектронної боротьби. Під час виконання завдання у них можуть виникнути проблеми у навігації через захоплення контролю над апаратом або підміною навігаційних даних, яка може не лише призвести до припинення виконання поставленої задачі, але й потенційно перетворити робота на зброю проти тих, хто його використовує. Тому забезпечення надійного захисту каналів управління та програмного забезпечення є критично важливим, але й водночас складним завданням [32].

Нормативно-правова база, що стосується надводних роботів, все ще перебуває на етапі формування, і існує потреба у стандартизованих правилах та інструкціях для їх безпечної та відповідальної експлуатації. Питання у

ліцензуванні, страхуванні, відповідальності та сертифікації безпеки, потребують врегулювання, щоб забезпечити їх широке впровадження у сфері людської діяльності. Відсутність чітких правових норм є обмежувальним фактором для розгортання та використання даних роботів у певних регіонах або для виконання певних задач [33].

Хоча надводні роботи забезпечують певну економію завдяки зниженню експлуатаційних витрат, проте початкові витрати на їх придбання, обслуговування та модернізацію можуть бути досить високими. Вартість сучасних технологій, таких як сенсори, системи зв'язку та додавання штучного інтелекту додатково підвищують загальну ціну всього робота. Обмежені фінансові можливості потенційних користувачів можуть стати перешкодою для широкого впровадження надводних роботів [33].

### 1.3 Аналіз аналогічних конструкцій

Перш ніж розробляти власну модель надводного мобільного робота, важливо проаналізувати вже існуючі рішення, які застосовуються у різних галузях, таких як моніторинг навколишнього середовища, охорона акваторій, рибний промисел або наукові дослідження. Аналіз дозволяє виявити ефективні технічні рішення, переваги та недоліки різних конструкцій.

AutoNaut – це безкіпажний надводний апарат, розроблений у Великій Британії компанією MOST (Autonomous Vessels) Ltd (рис. 1.6).

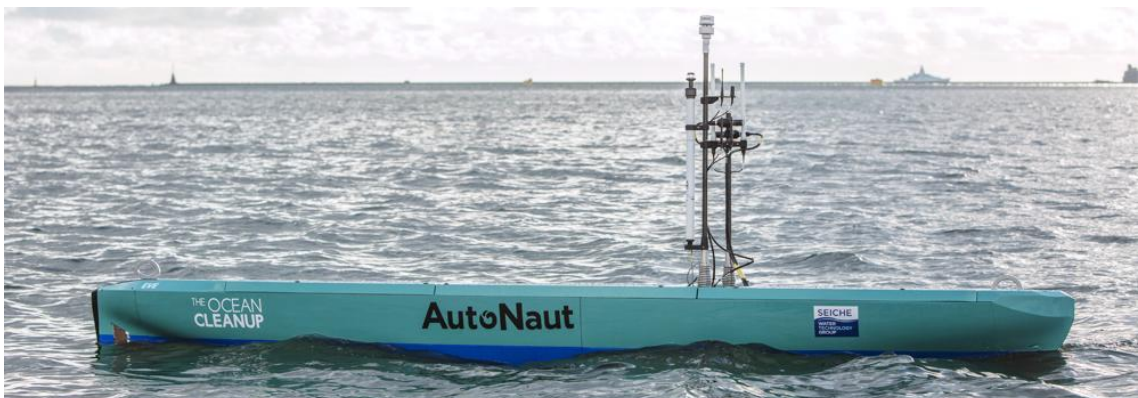


Рисунок 1.6 – AutoNaut [34]

Він призначений для тривалих автономних дослідницьких місій у морських умовах, використовуючи інноваційні технології для збору даних та моніторингу [34-35].

Дана автономна платформа не використовує традиційних рушіїв. Її рух забезпечується енергією морських хвиль за допомогою системи фойлів, встановлених на кілях спереду та ззаду корпусу. Ця технологія дозволяє апарату рухатися без використання традиційного пального та забезпечує безшумну та екологічно чисту експлуатацію.

Сонячні панелі на борту забезпечують живлення для електроніки та сенсорів, дозволяючи працювати автономно протягом тривалого часу. Завдяки своїй енергоефективності, AutoNaut може залишатися в морі протягом тижнів або навіть місяців, покриваючи великі відстані без необхідності в обслуговуванні. Крім того, доступні варіанти корпусу від 2 до 7 метрів, що дозволяє адаптувати апарат до різних завдань та умов експлуатації [36].

Однією з ключових переваг AutoNaut є його здатність працювати в морі протягом кількох тижнів або навіть місяців без необхідності в обслуговуванні. Це досягається завдяки використанню хвильової та сонячної енергії, які забезпечують рух, живлення сенсорів та систем зв'язку. Використання даних видів енергії забезпечує нульові викиди під час експлуатації, що робить AutoNaut екологічно чистим. Відсутність двигунів дозволяє апарату працювати практично безшумно, що є важливим для спостереження за водною фауною.

Проте, AutoNaut має і певні недоліки. Його швидкість обмежується приблизно 1-3 вузлами, що може бути недостатньо для деяких задач. Крім того, в умовах штилю або дуже спокійного моря ефективність хвильової енергії знижується, що може вплинути на його здатність пересуватися. Також, обмежена вантажопідйомність означає, що кількість обладнання, яке можна встановити на борту, обмежена, що може звужити сферу його застосування. Наявність фойлів у конструкції значно обмежує можливість використання апарата на мілководді, оскільки вони можуть зачіпатися за дно або підводні

перешкоди. Крім того, фойли роблять пристрій вразливим до обростання водоростями та іншою водною рослинністю, що може призвести до зниження ефективності руху, зростання опору та потреби в регулярному технічному обслуговуванні.

OceanAlpha SL20 – це малогабаритний надводний безпілотний апарат (рис. 1.7), призначений для гідрографічних досліджень водних об'єктів та їх екологічного моніторингу.

Апарат має довжину 1,05 м та ширину 0,55 м та вагу 17 кг. Живлення всіх вузлів здійснюється від акумуляторів, що забезпечують до 6 годин автономної роботи. Максимальна швидкість руху становить до 8 вузлів, що приблизно дорівнює 4 м/с. Має вантажопід'ємність до 10 кг. Його система зв'язку забезпечує передачу телеметричних даних на відстані до 2 км, а дистанційне керування можливе в межах 1 км. Корпус робота виготовлений із вуглецевого волокна, а привід реалізовано у вигляді водометного рушія закритого типу. Для дослідження річок, озер, морів та інших водойм він має різноманітні ехолоти та акустичний доплерівський профілемір течії [37].



Рисунок 1.7 – OceanAlpha SL20 [37]

Однією з ключових переваг OceanAlpha SL20 є компактність та легкість корпусу, що дозволяє одному оператору без зусиль транспортувати та запускати апарат. Крім того таке виконання корпусу забезпечує можливість проведення досліджень у надзвичайно мілководних зонах. Висока маневреність та водометний привід закритого типу дозволяють уникати заплутування у водоростях та смітті. Можливість встановлення різноманітного гідрографічного обладнання робить SL20 універсальним інструментом для різних типів досліджень. Автономність, яка сягає до 6 годин, дозволяє повноцінно виконувати поставлені задачі без частної зарядки.

Водночас конструкція SL20 має й певні недоліки, передусім форма корпусу не дозволяє працювати за несприятливих погодних умов. Його вантажопідйомність обмежена 10 кг, що може бути недостатньо для встановлення деякого спеціалізованого обладнання. Дальність зв'язку обмежена до 2 км, а дальність дистанційного керування до 1 км, що може бути недостатньо для деяких віддалених задач. Також його висока вартість робить цей апарат менш доступним для впровадження.

CAT-Surveyor – це безпілотний надводний апарат катамаранного типу (рис. 1.8), розроблений компанією Subsea Tech для гідрографічних досліджень, екологічного моніторингу та патрулювання в прибережних, портових та внутрішніх водах [38].



Рисунок 1.8 – CAT-Surveyor [38]

CAT-Surveyor має довжину 3 метри, ширину 1,6 м та висоту 1,2 м, при цьому його вага без навантаження становить 270 кг, а вантажопідйомність до 80 кг. Завдяки катамаранній конструкції та осадці від 36 до 48 см, він здатний працювати в відносному мілководді. Робот оснащений двома електродвигунами потужністю по 500 Вт кожен і живиться від двох літій-іонних акумуляторів, які забезпечують до 12 годин автономної роботи. CAT-Surveyor має сучасну систему навігації, що включає диференціальну глобальну систему позиціонування та дві камери для візуального спостереження. Зв'язок з оператором здійснюється через Wi-Fi 5 ГГц з радіусом дії до 5 км, а також передбачено резервний канал на частоті 2,4 ГГц. Керувати апаратом можна дистанційно за допомогою ноутбука з джойстиком, або він може працювати в автономному режимі. Окрім цього, він може бути оснащений додатковим обладнанням, таким як сонари, акустичним доплерівським вимірювачем течії, лазерними сканерами та магнітометрами [38].

Головною перевагою CAT-Surveyor є сумісність з сучасними сенсорами і технологіями обробки даних, які забезпечують максимально точні результати. Можливість інтеграції з широким спектром додаткового обладнання робить його адаптивним до різних завдань. Конструкція робота дозволяє йому впевнено працювати навіть у важких кліматичних умовах. Автономність до 12 годин дозволяє виконувати завдання без необхідності частого обслуговування.

Проте, поряд з численними перевагами, CAT-Surveyor має і певні недоліки. Серед них варто відзначити високу вартість обладнання, яка робить цей апарат менш доступним. Для підтримання високої продуктивності та сумісності з новітніми технологіями система потребує регулярного оновлення програмного забезпечення або модернізації апаратної частини. Крім того, для безпечної експлуатації необхідно навчати оператора, що займає певний час та несе додаткові фінансові витрати. Слід зазначити, що у разі виникнення несправностей, технічне обслуговування та заміна компонентів можуть бути

ускладнені та займати більше часу через складність конструкції та специфічність обладнання. Відкрити привід може призвести до намотування на нього водоростей та іншої рослинності, що впливає на використання робота в місцях сильної забрудненості.

Sonobot 5 – це сучасний надводний безпілотний робот (рис. 1.9), розроблений німецькою компанією EvoLogics GmbH для проведення гідрографічних досліджень, тривимірного картографування, виявлення вибухонебезпечних предметів та екологічного моніторингу [39-40].



Рисунок 1.9 – Sonobot 5 [40]

Sonobot 5 має тримаранну конструкцію, оснащений потужними електродвигунами та акумулятором, який забезпечує до 9 годин автономної роботи. Його габарити становлять 130 см у довжину, 92 см у ширину та 80,5 см у висоту, при вазі близько 27 кг. Осадка апарата лише 15 мм, максимальна швидкість руху 5 м/с, а операційна дальність понад 30 км. Зв'язок з оператором здійснюється на відстані до 2,5 км за допомогою спрямованої антени.

Для визначення місцеположення використовується супутникова та інерційна навігація. Sonobot 5 може працювати як у ручному, так і в автономному режимі за заздалегідь заданим маршрутом. Робот оснащений різноманітними сенсорами, зокрема багатопроменевими ехолотами, гідролокаторами бічного огляду та фронтальною камерою з функціями трансляції та запису відео [39-40].

Однією з ключових переваг Sonobot 5 є висока точність вимірювань, завдяки чому робот здатний виявляти найдрібніші деталі підводного рельєфу та об'єктів. Високий рівень автономності та енергоспоживання дозволяють Sonobot 5 ефективно працювати у віддалених місцях без постійного підключення до зовнішніх джерел електроживлення. Конструкція апарата дозволяє оснащувати його різними сенсорами та камерами залежно від завдань. Легкість транспортування та зборки дозволяє одній людині управляти та обслуговувати робота.

Серед недоліків Sonobot 5 варто відзначити його високу вартість. Крім того, для повноцінного використання всіх можливостей робота, оператор потрібен мати спеціалізовані знання, що несе за собою додаткові витрати. Як і будь-яке складне технічне обладнання, Sonobot 5 потребує регулярного технічного обслуговування та потенційно складного ремонту у випадку пошкодження, особливо його високотехнологічних сонарних систем.

#### 1.4 Збір та обробка даних за допомогою датчиків

Сенсори в робототехніці – це пристрої, які вимірюють певні параметри навколишнього середовища та перетворюють їх на сигнали, для подальшої обробки роботом. Ці параметри можуть включати відстань, положення, інтенсивність світла, температуру, вологість, тиск або навіть хімічний склад. Отримані дані дозволяють роботам адаптуватись до змін у середовищі, а також сприймати своє оточення, подібно до того, як наші органи чуття передають інформацію до мозку [41].

Сенсорні системи мають вирішальне значення для надводних роботів, адже саме вони забезпечують їм здатність до навігації, виявлення перешкод, моніторингу навколишнього середовища та виконання спеціалізованих задач. Завдяки сенсорам вони можуть збирати точну інформацію про своє положення в просторі, швидкість, орієнтацію, а також про умови навколишнього середовища.

Для точного визначення положення та орієнтації надводних роботів використовуються такі сенсори:

- глобальні навігаційні супутникові системи, які забезпечують визначення координат робота;
- інерціальні навігаційні системи, які використовують гіроскопи та акселерометри для визначення орієнтації та швидкості руху;
- доплерівські вимірювачі швидкості, які вимірюють швидкість відносно дна або води, за допомогою ефекту Доплера.

Для забезпечення безпечного руху та уникнення зіткнень надводні роботи обладнуються:

- радарми для виявлення об'єктів на поверхні води на великій відстані;
- лідарами для тривимірного сканування навколишнього середовища;
- камерами, які забезпечують зчитування візуальної інформації, яка може бути використана для розпізнавання об'єктів, подальшого аналізу або уникнення перешкод [42-43].

Для дослідження водного та навколишнього середовища, проведення батиметричних вимірювань надводні роботи оснащуються:

- сонарними системами, які включають багатопроменеві ехолоти, бокові скануючі сонари та радари з синтетичною апертурою для детального картографування дна;
- гідрофонами, які приймають звукові хвилі, що виникають або поширюються у воді, для визначення швидкості течії води та інших гідродинамічних характеристик водного об'єкта;
- гідрологічними сенсорами, які збирають інформацію про рівень води,

швидкість течії та температуру водного середовища;

- температурними сенсорами, які вимірюють температуру води на різній либині;

- сенсорами каламутності (турбідності) – визначають прозорість води, що залежить від наявності розчинених та підвісних частинок для оцінки рівня забруднення водойми;

- сенсорами якості води, які вимірюють вміст розчиненого кисню, рН, концентрацію домішок для оцінки безпечності води та оперативного виявлення забруднення.

- сенсорами вітру, які реєструють швидкість і напрямок повітряних потоків над водною поверхнею для вивчення гідродинаміки водних об'єктів [44].

Для надводних роботів метеорологічні сенсори відіграють ключову роль, адже вони надають критично важливу інформацію про погодні умови, що дозволяє апаратам адаптувати свої маршрути та операції відповідно до стану навколишнього середовища.

Основними метеорологічними датчиками, які застосовуються у надводних роботах, є:

- анемометри, які вимірюють швидкість та напрямок вітру, використовуються для визначення курсу та швидкості руху;

- барометри, які вимірюють атмосферний тиск, дозволяють передбачати зміни погоди, такі як наближення штормів або зміну вітру;

- гігрометри, які визначають відносну вологість повітря, дозволяють передбачити формування туману та інших погодних явищ, які можуть обмежити видимість та вплинути на роботу сенсорів [45].

Надводні роботи для моніторингу біологічної активності у водних екосистемах, можуть використовувати флуорометри – датчики, які вимірюють концентрацію хлорофілу у воді шляхом аналізу флуоресценції, що є індикатором наявності фітопланктону [46].

## 2 ВИБІР ТА ОБГРУНТУВАННЯ ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ ДЛЯ СТВОРЕННЯ РОБОТА

### 2.1 Вибір компонентів робота

Для реалізації поставлених функцій надводного робота, було проведено аналіз та порівняння доступних технічних засобів. Основними критеріями вибору компонентів були енергоефективність та енергоспоживання, функціональні можливості, сумісність між елементами, простота реалізації та вартість. У цьому підрозділі наведено порівняльні характеристики основних компонентів та обґрунтовано вибір кожного з них.

Для забезпечення повного функціонування системи було визначено перелік необхідних компонентів, до якого входять: датчики перешкод, серводвигуни, двигуни, ехолот, драйвер моторів, акумуляторну батарею, систему керування батареєю, керуючий мікроконтролер, модуль камери, зовнішню антену та пропелери.

Одним із головних елементів системи є керуючий мікроконтролер, який відповідає за управління роботом. Для цього було обрано ESP32 DevKit v1, який має високу продуктивність, підтримку бездротового зв'язку і достатню кількість входів та виходів для підключення різних датчиків і пристроїв.

Загальний вигляд ESP32 DevKit v1 показано на рисунку 2.1.



Рисунок 2.1 – Загальний вигляд ESP32 DevKit V1 [47]

Основні характеристики мікроконтролера ESP32 DevKit V1:

- напруга живлення: 5 В;
- Wi-Fi стандарти: 802.11 b/g/n (до 150 Мбіт/с);
- Bluetooth: v4.2 BR/EDR і BLE;
- апаратні інтерфейси: UART, SPI, SDIO, I2C, PWM, I2S, GPIO, ADC, DAC;
- робочий струм (середній): 80 мА (середній) та 500 мА (піковий) [47].

Для реалізації відеоспостереження за навколишнім середовищем необхідно було обрати модуль камер, який може бути представленим як окремий модуль, так і працювати в парі з мікроконтролером або одноплатним комп'ютером. Було проаналізовано такі рішення: ESP32-CAM, OpenMV Cam H7 та Raspberry Pi Camera Module 3.

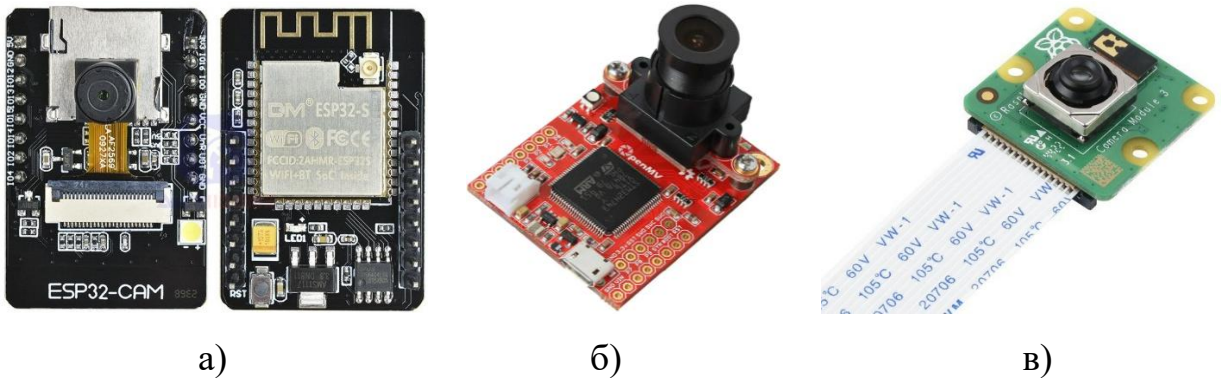
Результати порівняння технічних характеристик наведено у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Порівняння характеристик камер

Параметр	ESP32-CAM [48]	OpenMV Cam H7 [49]	Raspberry Pi Camera Module 3 [50]
1	2	3	4
Камера	OV2640	OV7725	Sony IMX708
Роздільна здатність	2 Мп	0,3 Мп	12 Мп
Максимальна кількість кадрів	до 60 кадрів/с	до 80 кадрів/с	до 120 кадрів/с
Інтерфейси	UART/SPI/ I2C/PWM/ ADC/DAC	USB, SPI, I2C, CAN	CSI, I2C
Робоча напруга	5 В	від 3,3 В до 5 В	5 В

Продовження таблиці 2.1

1	2	3	4
Wi-Fi / Bluetooth	Wi-Fi 802.11 b/g/n, Bluetooth 4.2 BR/EDR & BLE	Немає вбудованих модулів	Немає вбудованих модулів
Ціна	350 грн.	4990 грн.	1900 грн.



а)

б)

в)

а) загальний вигляд ESP32-CAM;

б) загальний вигляд OpenMV Cam H7;

в) загальний вигляд Raspberry Pi Camera Module 3

Рисунок 2.2 – Загальний вигляд камер [48-50]

На основі аналізу порівняння технічних характеристик камер, було обрано ESP32-CAM, адже вона забезпечує можливість відеотрансляції в режимі реального часу з поверхні води, потужності вбудованого мікроконтролера достатньо для реалізації в майбутньому базових алгоритмів комп'ютерного зору, компактні розміри та низька вага дозволяють інтегрувати її у малі надводні платформи без негативного впливу на плавучість і стійкість, енергоефективність модуля сприяє тривалій автономній роботі.

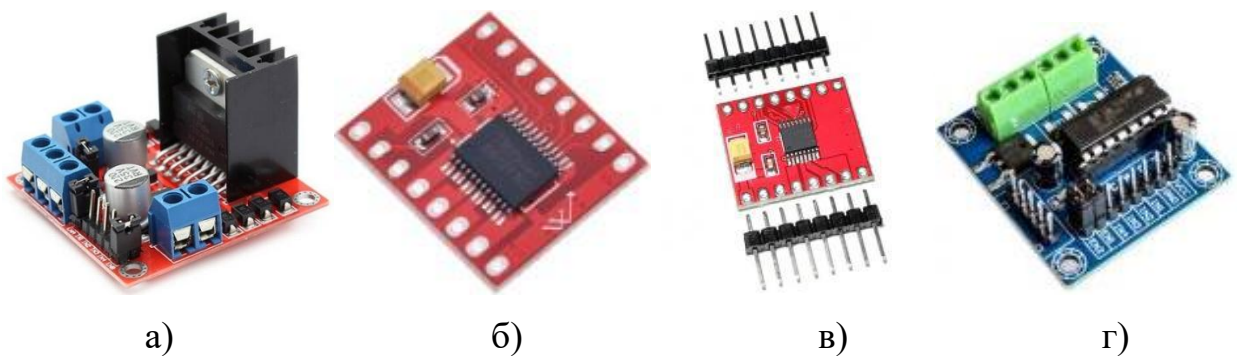
Для керування двома електродвигунами постійного струму, які забезпечують рух надводного робота, необхідно виконати вибір драйвера двигунів. Для цього було проаналізовано такі рішення: L298N, TB6612FNG, DVR8833 та L293D.

Результати порівняння технічних характеристик наведено у таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Порівняння характеристик драйверів двигунів

Параметр	L298N [51]	TB6612FNG [52]	DRV8833 [53]	L293D [54]
Робоча напруга	від 5 В до 35 В	від 4,5 В до 13,5 В	від 2,7 до 10,8 В	від 4,5 В до 36 В
Макс. струм на канал	2 А	1.2 А	1 А	1,2 А
Кількість каналів	2	2	2	2
Керування ШІМ	Так	Так	Так	Так
Вбудований регулятор 5В	Так	Ні	Ні	Ні
Робоча температура	від -25 °С до +130 °С	від -20 °С до +85 °С	від -40 °С до +85 °С	від 0 °С до +70 °С
Розміри	43 мм × 43 мм × 29 мм	21 мм × 19 мм	21 мм × 18 мм	33 мм × 35 мм × 10 мм
Ціна	90 грн.	94 грн.	52 грн.	62 грн.

Зовнішній вигляд проаналізованих драйверів двигунів показано на рисунку 2.3.



а) L298N; б) TB6612FNG; в) DRV8833; г) L293D

Рисунок 2.3 – Загальний вигляд драйверів двигунів [51-54]

На основі аналізу технічних характеристик було обрано драйвер L298N завдяки сумісності з обраними двигунами. Модуль підтримує струм до 2 А на канал, що покриває поточні потреби й забезпечує запас для потужніших моторів. Вбудований стабілізатор 5 В дозволяє жити мікроконтролер або інші компоненти, спрощуючи схему та знижуючи вартість. Радіатор забезпечує захист від перегріву, а доступна ціна робить модуль придатним як для базових, так і для розширених задач керування.

Для забезпечення руху надводного робота було обрано двигун постійного струму 12 В, зовнішній вигляд якого показано на рисунку 2.4. Цей двигун забезпечує достатню швидкість обертання та компактні розміри, і дозволяє ефективно використовувати його для приводу надводного робота.



Рисунок 2.4 – Зовнішній вигляд двигуна [55]

Основні характеристики двигуна постійного струму 12 В:

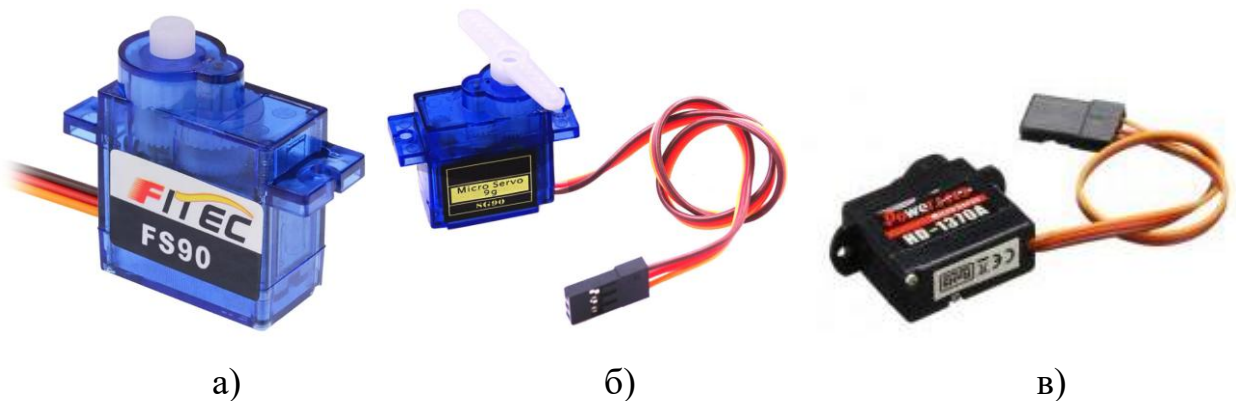
- робоча напруга: 12 В;
- швидкість обертання: 12000 об/хв;
- номінальний струм: 10 мА;
- діаметр корпусу: 23,9 мм;
- загальна довжина включаючи вісь: 45 мм [55].

Для забезпечення керування окремими рухомими елементами робота, такими як рульовий механізм, поворот камери та опускання ехолота, необхідно обрати сервоприводи. З урахуванням масогабаритних обмежень і невеликого навантаження розглядалися такі моделі: Feetech FS90, TowerPro SG90 та Power HD-1370A.

У таблиці 2.3 наведено порівняння технічних характеристик сервоприводів, зовнішній вигляд яких, показано на рисунку 2.5.

Таблиця 2.3 – Порівняння характеристик сервоприводів

Параметр	Feetech FS90 [56]	TowerPro SG90 [57]	Power HD-1370A [58]
Тип	Аналоговий	Аналоговий	Аналоговий
Напруга живлення	від 4,8 В до 6 В	від 3,5 В до 5 В	від 4,8 В до 6 В
Крутний момент	1,5 кг/см	2 кг/см	0,6 кг/см
Швидкість обертання	0,12 с/60° при 4,8 В; 0,1 с/60° при 6 В	0,12 сек/60° при 4,8 В	0,12 с/60° при 4,8 В; 0,1 с/60° при 6 В
Кут повороту	180°	180°	180°
Розміри	23 мм × 12,5 мм × 22 мм	23 мм × 29 мм × 12 мм	21 мм × 8,5 мм × 20 мм
Вага	9 г	15 г	3,7 г



а)

б)

в)

- а) загальний вигляд Feetech FS90;
- б) загальний вигляд TowerPro SG90;
- в) загальний вигляд Power HD-1370A;

Рисунок 2.5 – Загальний вигляд сервоприводів [56-58]

Серед розглянутих сервоприводів для керування рухомими частинами розроблюваного надвого робота було обрано TowerPro SG90. Цей сервопривід має оптимальне співвідношення розміру, ваги та потужності, що робить його найкращим для використання в конструкціях з обмеженим простором і невеликим навантаженням.

Для своєчасного виявлення перешкод у напрямку руху необхідно обрати ультразвуковий датчик. Принцип його роботи полягає у випромінюванні ультразвукових імпульсів і вимірюванні часу їх повернення після відбиття від об'єкта, що дозволяє визначити відстань до перешкоди. Для вибору відповідного датчика було проаналізовано кілька моделей: HC-SR04, US-015 та US-100.

У таблиці 2.4 наведено порівняння технічних характеристик ультразвукових датчиків, зовнішній вигляд яких показано на рисунку 2.6.

Таблиця 2.4 – Порівняння характеристик ультразвукових датчиків

Параметр	HC-SR04 [59]	US-015 [60]	US-100 [61]
1	2	3	4
Напруга живлення	5 В	5 В	від 3 В до 5 В
Споживаний струм	до 2 мА	до 3 мА	до 2 мА
Ефективний кут	15°	15°	15°
Частота випромінювання	40 кГц	40 кГц	40 кГц
Діапазон виміру відстані	від 2 см до 450 см	від 2 см до 400 см	від 2 см до 450 см
Максимальна точність виміру	0,3 см	0,3 см	0,3 см
Ціна	40 грн.	60 грн.	105 грн.



а) HC-SR04; б) US-015; в) US-100;

Рисунок 2.6 – Загальний вигляд ультразвукових датчиків [59-61]

На основі аналізу технічних характеристик було обрано ультразвуковий датчик HC-SR04. Цей датчик забезпечує достатню точність вимірювання, має невелику сліпу зону та вузький кут огляду, що зменшує ймовірність хибних спрацьовувань. Крім того, HC-SR04 є економічно вигідним варіантом.

Для живлення надводного робота було обрано три літій-іонні акумулятори типорозміру 18650 з номінальною напругою 3,7 В і ємністю 3200 мА·год [62]. З'єднання в послідовну збірку буде реалізовано за допомогою шилду для безпечного підключення з виводами під припаювання дротів.

Загальний вигляд акумулятору показано на рисунку 2.7.



Рисунок 2.7 – Загальний вигляд акумулятора Li-Ion типу 18650 [62]

Для забезпечення безпечної та стабільної роботи акумуляторної збірки, яка складається з трьох Li-Ion елементів типу 18650, було обрано плату захисту BMS (Battery Management System) 3S 20A. Ця плата підтримує максимальний безперервний струм заряду та розряду до 20 А. Крім того,

оснащена ключовими функціями захисту: від перенапруги, глибокого розряду, короткого замикання та перевантаження по струму, а також має систему балансування акумуляторів, що сприяє продовженню їх ресурсу [63].

Загальний вигляд плати захисту показано на рисунку 2.7.



Рисунок 2.8 – Загальний вигляд BMS плати [63]

Для зниження напруги з 12 В до стабільних 5 В для живлення сервоприводів і ультразвукового датчика використано DC-DC (Direct Current) конвертер на базі LM2596. Модуль підтримує вхідну напругу від 4,5 В до 40 В, регульовану вихідну від 3 В до 35 В та струм до 2 А, має захист від короткого замикання та компактні розміри [64].

Загальний вигляд DC-DC понижуючого конвертера на базі мікросхеми LM2596 показано на рисунку 2.9.



Рисунок 2.9 – Загальний вигляд DC-DC понижуючого конвертера на базі мікросхеми LM2596 [64]

Для забезпечення збирання даних про глибину, рельєф дна та підводні об'єкти в реальному часі у складі надводної роботизованої платформи було обрано ехолот Deeper Smart Sonar CHIRP +2, зовнішній вигляд якого показано на рисунку 2.10. Дана модель використовує технологію трипроменевого

ширококутне сканування, що передбачає передачу імпульсів з різною частотою, завдяки чому зменшуються шуми, покращується розділення об'єктів та деталізація зображення. Він підтримує створення батиметричних карт і передає дані бездротовим способом на мобільний пристрій [65].



Рисунок 2.10 – Загальний вигляд Deeper Smart Sonar CHIRP +2 [65]

Основні характеристики:

- тип з'єднання: Wi-Fi (дальність до 120 м);
- вбудований GPS: так;
- діапазон глибини: 15 см-100 м;
- частота сканування: 15 сканів/с;
- температурний датчик: наявний;
- акумулятор: Li-ion 3,8 В, 1300 мА·год;
- час роботи: до 15 годин;
- вага: 92 г [27].

Для підвищення якості та стабільності Wi-Fi з'єднання було обрано зовнішню антену Wi-Fi 2.4 ГГц 3 dBi SMA-plug з кабелем IPX (U.FL), зовнішній вигляд якої показано на рисунку 2.11. Ця антена забезпечує покращений прийом і передачу сигналу для ESP32-CAM у середовищах з перешкодами або на більших відстанях від оператора [66].



Рисунок 2.11 – Зовнішня антена Wi-Fi 2.4 ГГц 3 dBi [66]

Основні характеристики:

- діапазон частот: 2,4 ГГц (підтримка Wi-Fi 802,11 b/g/n);
- коефіцієнт підсилення: 3 dBi;
- тип антени: всепрямована [66].

Для руху надводного робота обрано повітряний привід з пропелерами KingKong 5045 V2 Bullnose (рис. 2.12) з високоміцного пластику [67].



Рисунок 2.12 – KingKong 5045 V2 Bullnose [67]

Такий привід розташовується над водою, що дозволяє уникнути намотування водоростей і забезпечує стабільну роботу навіть у забруднених водоймах.

## 2.2 Структурна схема робота

Структурна схема надводного робота, яка представлена на рисунку 2.13, відображає взаємодію основних систем і компонентів, які забезпечують його функціонування.

Схема розроблена з урахуванням логічної організації підсистем, що дозволяє чітко зрозуміти їхню роль і взаємозв'язки в загальній структурі системи робота.

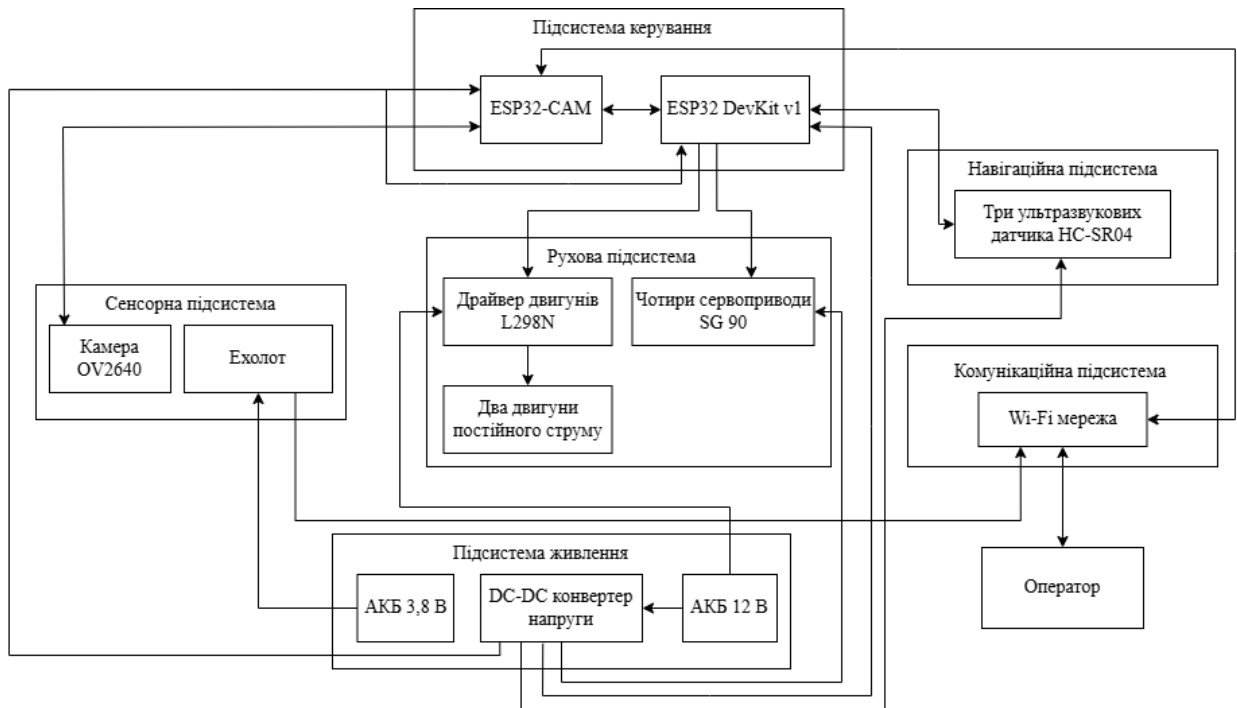


Рисунок 2.13 – Структурна схема надводного робота

Структурна схема надводного робота включає в себе такі підсистеми: живлення, управління, сенсорну, комунікаційну, навігаційну та рухову.

Підсистема керування є центральним блоком, який складається з модулів ESP32-CAM і ESP32 DevKit V1. ESP32-CAM відповідає за створення Wi-Fi точки доступу та веб-серверу, трансляцію відеопотоку, отримання та надсилання команд на ESP32 DevKit V1, який координує роботу всіх інших систем, забезпечуючи керування рухом, обробку даних від сенсорів і передачу інформації.

Рухова підсистема містить драйвер двигунів L298N, два двигуни постійного струму та чотири сервоприводи SG90. Драйвер L298N забезпечує керування двигунами, дозволяючи регулювати їхню швидкість і напрямок руху. Сервоприводи SG90 відповідають за керування кермами робота,

поворотом камери та опусканням ехолота.

Навігаційна підсистема складається з трьох ультразвукових датчиків HC-SR04 спереду, зліва та справа робота, що використовуються для виявлення перешкод і вимірювання відстані до найближчих об'єктів, що забезпечує безпечну навігацію робота у водному середовищі.

Сенсорна підсистема включає модуль камери OV2640, який забезпечує захоплення відеопотоку для віддаленого моніторингу або автономної обробки зображень. Крім того, сюди входить ехолот, який вимірює глибину водойми, рельєф дна, температуру водного середовища та виявляє підводні об'єкти.

Комунікаційна підсистема представлена Wi-Fi мережею, яка забезпечує двосторонній зв'язок між роботом і оператором. Через Wi-Fi передаються команди керування, а також відеопотік і дані від сенсорів.

Підсистема живлення складається з головного акумулятора напругою 12 В, від якого живляться двигуни через драйвер L298N. Для живлення логічної частини використовується понижуючий стабілізатор DC-DC конвертер на базі LM2596, який забезпечує стабільні 5 В. Ця напруга подається на ESP32 DevKit V1, модуль камери ESP32-CAM, ультразвуковий датчик HC-SR04 та сервоприводи SG90. Ехолот живиться від внутрішньої батареї 3,8 В.

### 2.3 Схема підключення компонентів робота

У підрозділі 2.1 було виконано аналіз та вибір найкращих компонентів для надводного робота з урахуванням їх технічних характеристик, функціональних можливостей та сумісності. Після визначення необхідної елементної бази наступним логічним кроком є розробка електричної схеми підключення, яка забезпечить коректну взаємодію всіх модулів та систем робота між собою.

На рисунку 2.14 показано електричну схему підключення всіх компонентів надводного робота, яка була розроблена за допомогою онлайн сервісу Circuit Design.

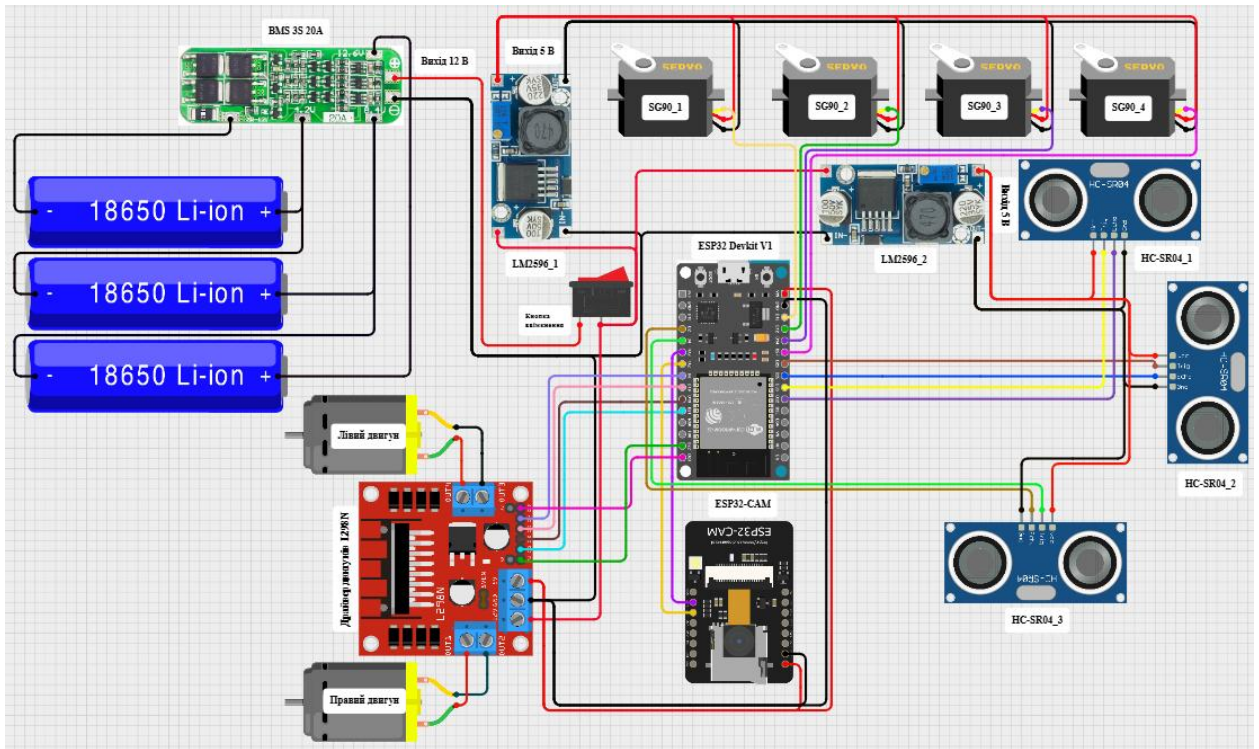


Рисунок 2.14 – Електрична схема підключення компонентів надводного робота

Система живлення робота включає три послідовно з'єднані Li-ion акумуляторів формату 18650, які забезпечують напругу 12 В. Для захисту та керування зарядом використовується плата BMS 3S 20A, до якої під'єднані акумулятори. Увімкнення живлення системи здійснюється через кнопку.

Позитивний контакт правого двигуна підключено до піна OUT1, а негативний до піна OUT2 драйвера двигунів L298N. Негативний контакт лівого двигуна підключено до піна OUT3, а позитивний до піна OUT4 драйвера двигунів. Мотори живляться від 12 В, які подаються від акумулятора на пін +12 В драйвера двигунів L298N, через кнопку живлення.

ESP32 DevKit V1 керує двигунами робота через піни: D5 (GPIO5) підключений до IN1, D18 (GPIO18) до IN2, D19 (GPIO19) до IN3, а D21 (GPIO21) до IN4. Живлення драйвера L298N подається від акумулятора 12 В: позитивний контакт підключений до піна +12 В, негативний до GND. Пін ENA, що керує правим двигуном, підключено до D22 (GPIO22), а пін ENB, що керує лівим двигуном до D23 (GPIO23). Використовуючи ШІМ-сигнали

(Широтно-імпульсна модуляція), можна швидко вмикати та вимикати живлення, регулюючи швидкість обертання двигунів.. Зняті перемички на пінах ENA та ENB дозволяють підключити ШІМ для контролю швидкості. Вбудований стабілізатор драйвера знижує напругу з 12 В до 5 В для живлення своєї логіки.

Модуль камери ESP32-CAM підключений до ESP32 DevKit V1 через інтерфейс UART: пін TX камери з'єднано з піном RX (GPIO16), а пін RX з піном TX (GPIO17). Живлення камери подається від виходу 5 В на виході драйвера двигунів.

Чотири сервоприводи керуються за допомогою плати ESP32 DevKit V1. Сигнальний пін першого сервопривода, який відповідає за опускання ехолота, підключено до D13 (GPIO13), другого, який відповідає за поворот камери, до D12 (GPIO12), третього, який приводить в дію ліве кермо, до D14 (GPIO14), а четвертого, який приводить в дію праве кермо, до D27 (GPIO27). Кожен сервопривід отримує живлення від DC-DC конвертера на базі LM2596, який забезпечує на виході 5 В.

Ультразвукові датчики HC-SR04 підключені до плати ESP32 DevKit V1 таким чином: Trig правого датчика на D2 (GPIO2), Echo правого датчика на D4 (GPIO4); Trig лівого датчика на D33 (GPIO33), Echo лівого датчика на D32 (GPIO32); Trig переднього датчика на D25 (GPIO25), Echo датчика на D26 (GPIO26). Датчики живляться від понижаючого конвертера на базі LM2596, який забезпечує 5 В на виході.

Розроблена електрична схема забезпечує надійну взаємодію всіх компонентів надводного робота, створюючи основу для подальшої реалізації програмного забезпечення та тестування системи в реальних умовах.

## 2.4 Розрахунок часу автономної роботи надводного робота

У процесі розроблення надводного робота особливо важливо розрахувати чи вистачить обраного акумулятора для необхідного часу його

автономної роботи без підзарядки протягом 2 годин. Це дозволить уникнути несподіваної зупинки робота під час виконання поставлених завдань.

Для проведення розрахунків використаємо формулу (2.1).

$$Q = \frac{P_3 \times t}{V \times k}, \quad (2.1)$$

де  $Q$  – ємність АКБ, що розраховується (А × год або мА × год);

$P_3$  – навантажувальна потужність (Вт);

$t$  – часовий проміжок резервування (год);

$V$  – напруга батареї (В);

$k$  – коефіцієнт, що відображає якась частина ємності батареї використовується.

Загальна навантажувальна потужність всіх елементів системи знаходить за формулою:

$$P_3 = P_1 + P_2 + \dots + P_n, \quad (2.2)$$

де  $P_1 + P_2 + \dots + P_n$  – це потужність, яку споживає кожен елемент системи.

У свою чергу потужність розраховується за формулою:

$$P = V \times I, \quad (2.3)$$

де  $V$  – робоча напруга живлення;

$I$  – споживаний елементом струм.

Відповідно до даних з підрозділу 2.1 підставимо їх у формулу (2.3) та отримаємо середню потужність кожного елемента системи:

- ESP32 DevKit V1 споживає приблизно 1,25 Вт;
- ESP32-CAM споживає приблизно 1 Вт;
- чотири сервоприводи SG90 споживають в середньому 0,25 Вт;

- ультразвуковий датчик HC-SR04 споживає 0,04 Вт;
- драйвер двигунів L298N споживає 0,6 Вт;
- конвертер напруги на базі LM2596 споживає 0,6 Вт;
- два двигуни постійного струму споживають 10 Вт.

Тоді загальна навантажувальна потужність всіх елементів за формулою (2.2) буде дорівнювати:

$$P_3 = 1,25 + 1 + 0,25 + 0,04 + 0,6 + 10 + 0,18 = 13,32 \text{ (Вт)}.$$

Часовий проміжок резервування  $t = 2$  години, напруга батареї  $V = 12$  В (3 послідовно з'єднані акумулятори), коефіцієнт використання ємності:  $k = 0,8$  (для безпечного використання акумулятора).

Звідси ємність акумуляторної батареї за формулою (2.1) буде дорівнювати:

$$Q = \frac{13,32 \times 2}{12 \times 0,8} \approx 2,78 \text{ (А} \times \text{год)}.$$

Отже, ємність обраної акумуляторної батареї 3200 мА×год або 3,2 А×год перевищує розраховане значення необхідної ємності батареї та свідчить про правильний вибір.

## 2.5 Комп'ютерне моделювання системи автоматичного управління

Розглянемо модель системи автоматичного регулювання швидкості двигуна постійного струму за допомогою пропорційно-інтегрально-диференціального (ПІД) регулятора. Для моделювання використано інструменти середовища MATLAB. Основна мета – побудова передавальної функції системи, отримання перехідної характеристики та перевірка стійкості замкненої системи за критеріями Гурвіца, Найквіста та Михайлова.

Припустимо, що ми хочемо підтримувати швидкість двигуна на рівні 5000 об/хв.

Тоді задане значення швидкості  $r(t) = 5000$  об/хв, а фактичне значення швидкості (виміряне датчиком)  $y(t) = 4900$  об/хв.

Помилка регулювання буде дорівнювати  $e(t) = r(t) - y(t) = 5000$  об/хв - 4900 об/хв = 100 об/хв.

Припустимо, що коефіцієнти для ПІД-регулятора налаштовані так:  $K(p) = 1,8$ ;  $K(i) = 0,05$ ;  $K(d) = 0,2$ .

Тоді компоненти ПІД будуть такими:

– пропорційний компонент ( $P$ ):  $P = K(p) \times e(t) = 1,8 \times 100$  об/хв = 180 об/хв;

– інтегральний компонент ( $I$ ), припустимо, що інтеграл помилки за час дорівнює 500 об·хв:  $I = K(i) = \int_0^t e(\tau) d\tau = 0,05 \times 500 = 25$  (об/хв);

– диференціальний компонент ( $D$ ), припустимо, що швидкість зміни помилки дорівнює -20 об/хв<sup>2</sup>:  $D = K(d) = \frac{d}{dt} e(t) = 0,2 \times (-20 \text{ об/хв}^2) = -4$  (об/хв).

Загальний контрольний сигнал ( $u(t)$ ):  $u(t) = P + I + D = 180$  об/хв + 25 об/хв - 4 об/хв = 201 об/хв.

Цей сигнал може бути використаний для керування двигуном, щоб збільшити його швидкість і підтримувати її на заданому рівні.

Нехай параметри нашого двигуна постійного струму будуть наступними:

- опір обмотки  $R = 1,5$  Ом;
- константа крутного моменту  $k_t = 0,015$  Н·м/А;
- константа проти-ЕРС  $k_b = 0,015$  В·с/рад;
- момент інерції ротора  $J = 0,02$  кг·м<sup>2</sup>;
- коефіцієнт в'язкого тертя  $b = 0,08$  Н·м·с/рад.

Тепер ми можемо підставити ці значення у передавальну функцію:

$$G(s) = \frac{\Omega(s)}{V(s)} = \frac{k_t}{(Js+b)R+k_bk_t}$$

Отримаємо:

$$G(s) = \frac{0,015}{(0,008s+0,08) \cdot 1,5+0,015 \cdot 0,012} = \frac{0,015}{0,012s+0,1202}$$

Отримана передавальна функція показує, як кутова швидкість двигуна змінюється відносно прикладеної напруги. Це може знадобитись для аналізу стабільності та проектування контролера для двигуна [68].

За допомогою програмного забезпечення MatLab знайдемо перехідну характеристику отриманої передавальної функції.

Для цього введемо параметри та запишемо передавальну функцію за допомогою коду:

```
s = tf('s');
```

```
P = Kt / ((J*s + b)*R + Kt*Kb);
```

Далі введемо параметри ПІД-регулятора за допомогою коду:

```
PID = Kp + Ki/s + Kd*s;
```

Потім за допомогою наступних рядків коду знайдемо передавальну функцію замкненої системи:

```
T_closed = feedback(PID * P_motor, 1);
```

Після цього за допомогою команди `step(T_closed)` отримаємо перехідну характеристику замкненої системи (рис. 2.15).

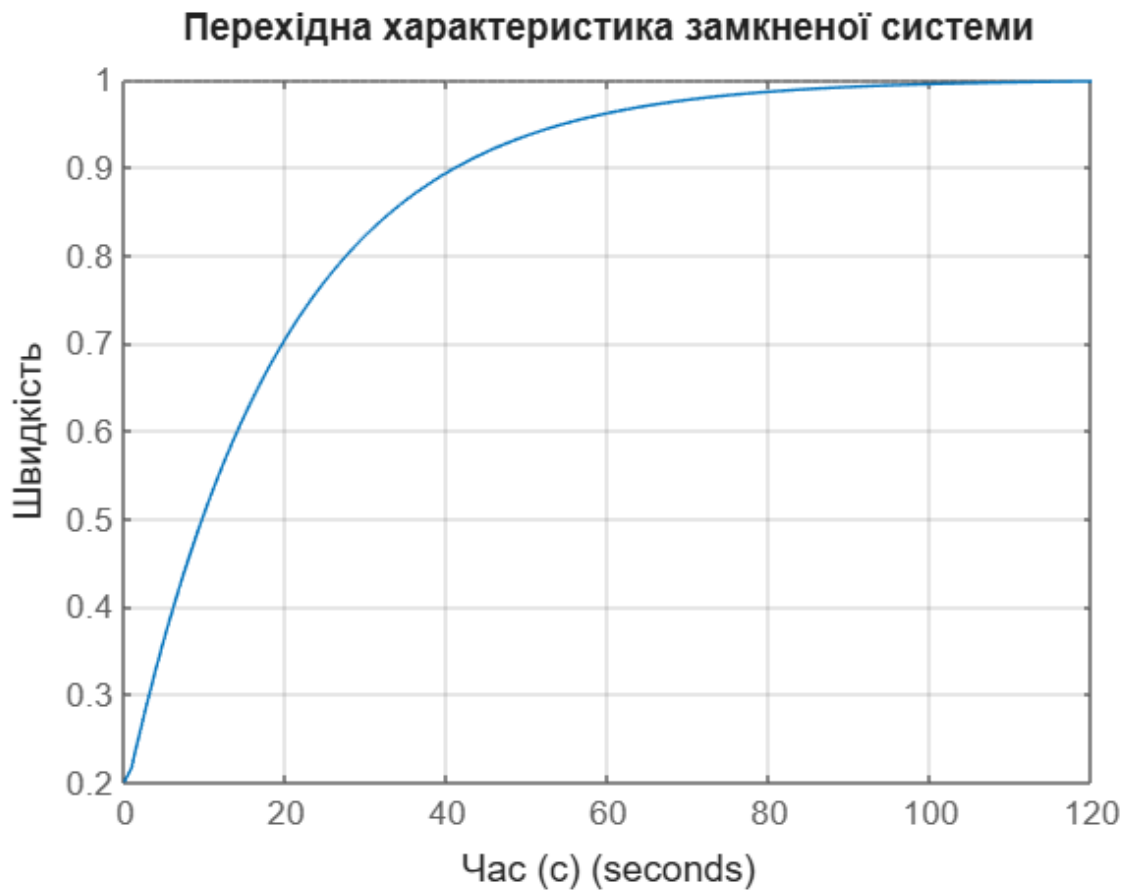


Рисунок 2.15 – Перехідна характеристика замкненої системи

Із рисунка 2.15 видно, що перехідний процес збігається до сталого значення, відсутнє перерегулювання, що свідчить про правильне налаштування ПІД-регулятора.

Наступним кроком за допомогою команди `nyquist(T_closed)` отримаємо діаграму Найквіста (рис. 2.16).

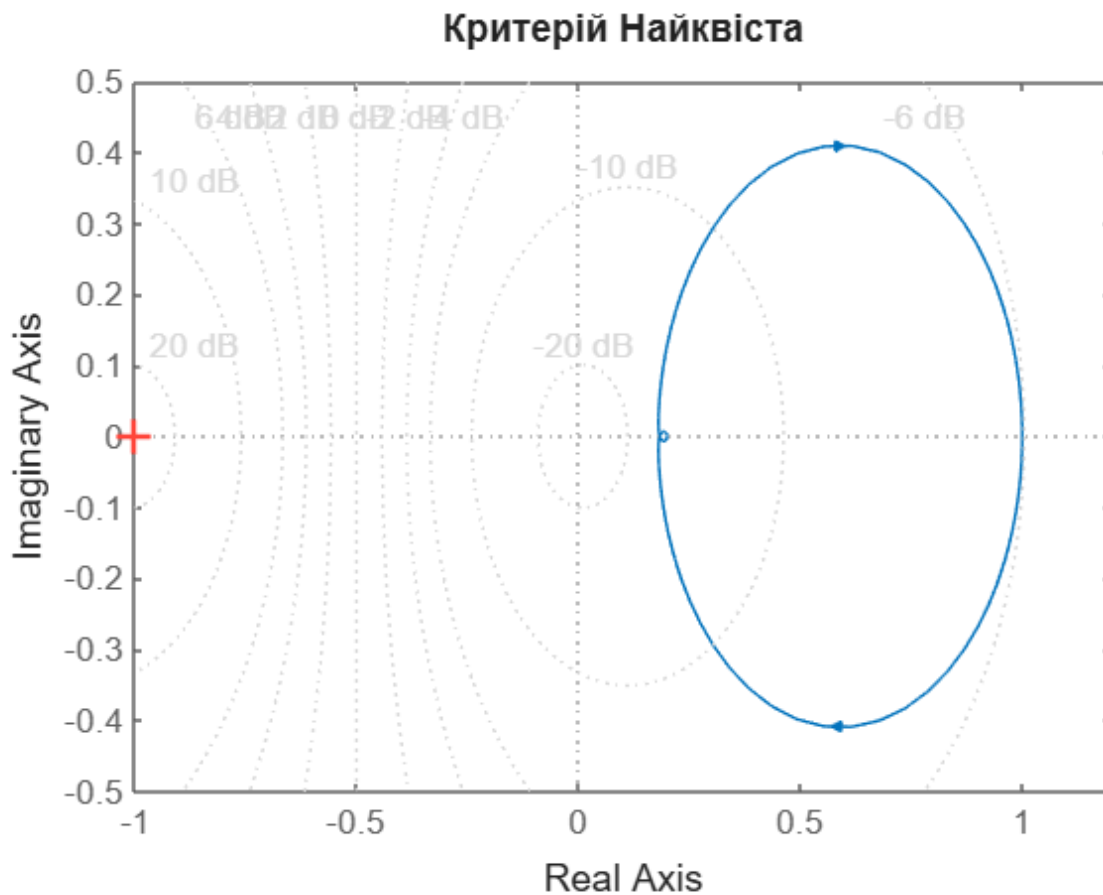


Рисунок 2.16 – Критерій Найквіста

Із рисунка 2.16 видно, що замкнена система стійка, оскільки характеристика не охоплює критичну точку  $(-1, 0j)$ , а проходить справа від неї у вигляді замкненого контуру в правій півплощині.

За допомогою функції `poles = pole(T_closed)` знаходимо корені замкненої системи та отримуємо: -9.7608 та -0.0512.

Усі корені в лівій півплощині комплексної площини, що означає, про те що система є стійкою [68].

## 3 РОЗРОБЛЕННЯ МАКЕТУ НАДВОДНОГО РОБОТА ДЛЯ ЗБОРУ ТА ОБРОБКИ ДАНИХ

### 3.1 Блок-схема алгоритму роботи програми

Алгоритм – це чітка послідовність дій або інструкцій, призначена для розв’язання певної задачі або досягнення результату. Алгоритм дозволяє систематизувати логіку роботи пристрою, забезпечити передбачувану поведінку програми та полегшити пошук помилок.

Розглянемо представлення логіки функціонування двох мікроконтролерів ESP32-CAM та ESP32 DevKit V1, які спільно реалізують управління надводним роботом із можливістю передачі відео та обробки команд у реальному часі. Кожен із мікроконтролерів виконує свою частину задачі, але обидва тісно взаємодіють через UART-зв’язок, забезпечуючи повноцінну та скоординовану роботу системи.

Створена блок-схема алгоритму роботи програми для мікроконтролера ESP32-CAM показано на рисунках 3.1-3.2.



Рисунок 3.1 – Алгоритм роботи програми ESP32-CAM (частина 1)

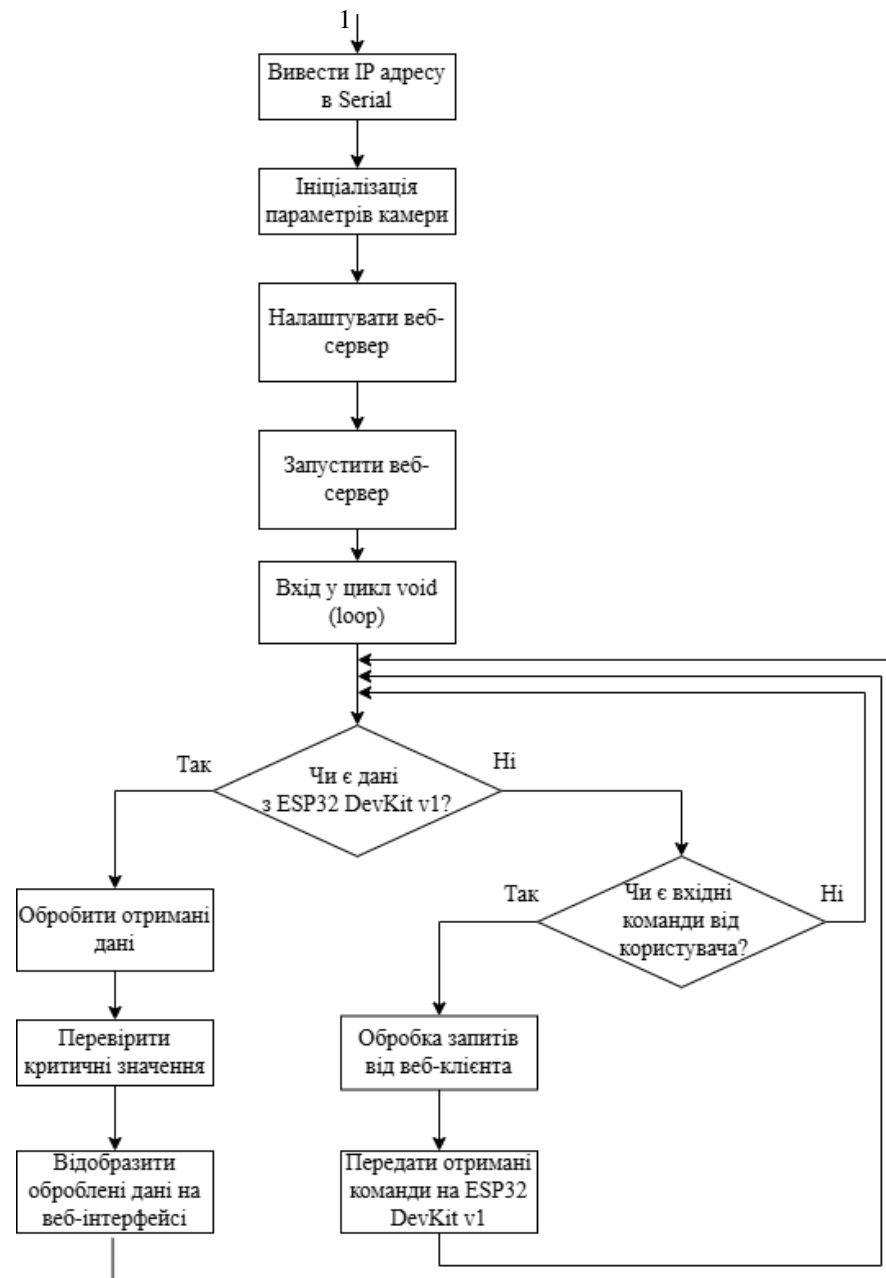


Рисунок 3.2 – Алгоритм роботи програми ESP32-CAM (частина 2)

Робота починається з ініціалізації, де підключаються необхідні бібліотеки, визначаються пін-конфігурації камери, а також оголошуються змінні. Після налаштування серійного порту та створення точки доступу Wi-Fi, у Serial Monitor виводиться IP-адреса. Далі відбувається ініціалізація камери, конфігурація веб-сервера і його запуск. Після завершення підготовчих процедур ESP32-CAM входить у основний цикл loop, у якому безперервно перевіряє наявність даних, отриманих від плати ESP32 DevKit V1, або запитів користувача через вебінтерфейс. Якщо надходять дані від DevKit, вони

обробляються, перевіряються на критичні значення (небезпечні відстані до перешкод), а потім результати відображаються на веб-інтерфейсі. Якщо ж надходять запити від користувача (наприклад, команди керування), то вони передаються у форматі команд до ESP32 DevKit V1 для виконання.

Створена блок-схема алгоритму роботи програми для мікроконтролера ESP32 DevKit V1 показано на рисунку 3.3.

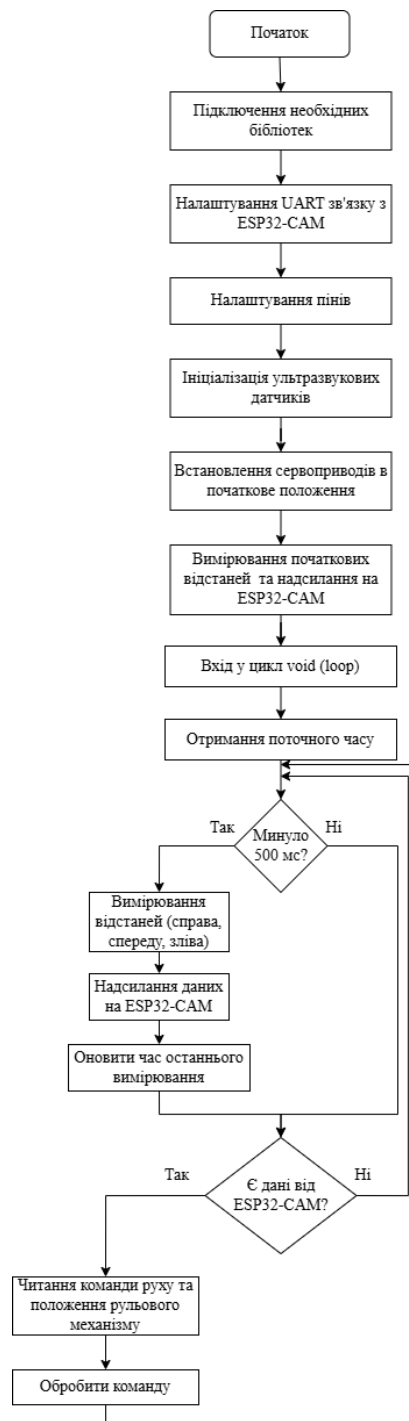


Рисунок 3.3 – Алгоритм роботи програми ESP32 DevKit v1

Робота починається з підключення бібліотек і налаштування UART-зв'язку з ESP32-CAM. Визначаються відповідні піни, ініціалізуються ультразвукові датчики та встановлюється початкове положення сервоприводів. Відразу після цього проводяться перші вимірювання відстаней до перешкод навколо робота, які надсилаються на ESP32-CAM. У циклі loop відбувається періодичне з інтервалом у 500 мс опитування трьох ультразвукових сенсорів з правого, лівого та переднього боків. Зібрані дані надсилаються на ESP32-CAM, після чого перевіряється наявність вхідних команд від нього. Отримавши команду керування, зчитується напрямок руху та кут повороту кермового механізму, а також положення серводвигунів повороту камери та опускання ехолота, які обробляються відповідним чином для зміни положення або швидкості руху робота.

Після надходження керувальної команди ESP32 DevKit V1 зчитує параметри руху, такі як напрямок та сторону повороту, і на їх основі регулює рух робота, а також управляє сервоприводами.

### 3.2 Створення конструкції робота

Для створення корпусу робота було використано екструдований пінополістирол, який є легким, водостійким матеріалом, зручним для макетування. Робота над конструкцією розпочалась із виготовлення базової платформи, яка служитиме основою для всієї електроніки та рухомих елементів. Основу склали два поплавки та центральна прямокутна платформа, розташована між ними. Така катамаранна конструкція дозволяє досягти стійкості на воді та забезпечити достатньо простору для розміщення компонентів.

Спочатку з пінополістирольного листа були вирізані такі основні елементи: два видовжені корпуси, що служать поплавками, прямокутна платформа, яка буде основою для встановлення електроніки і механіки, а також платформи під розміщення двигунів (рис. 3.4).

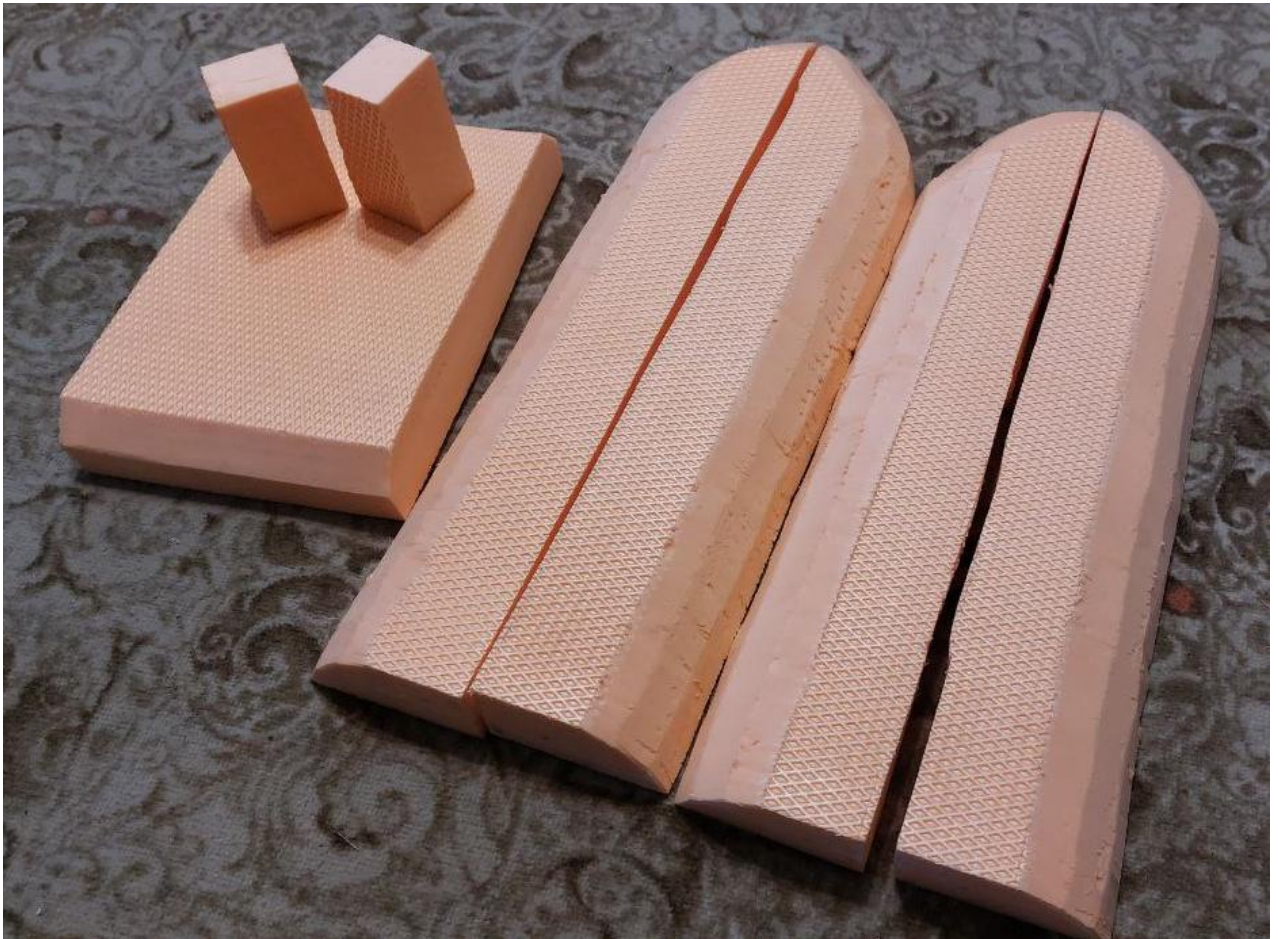
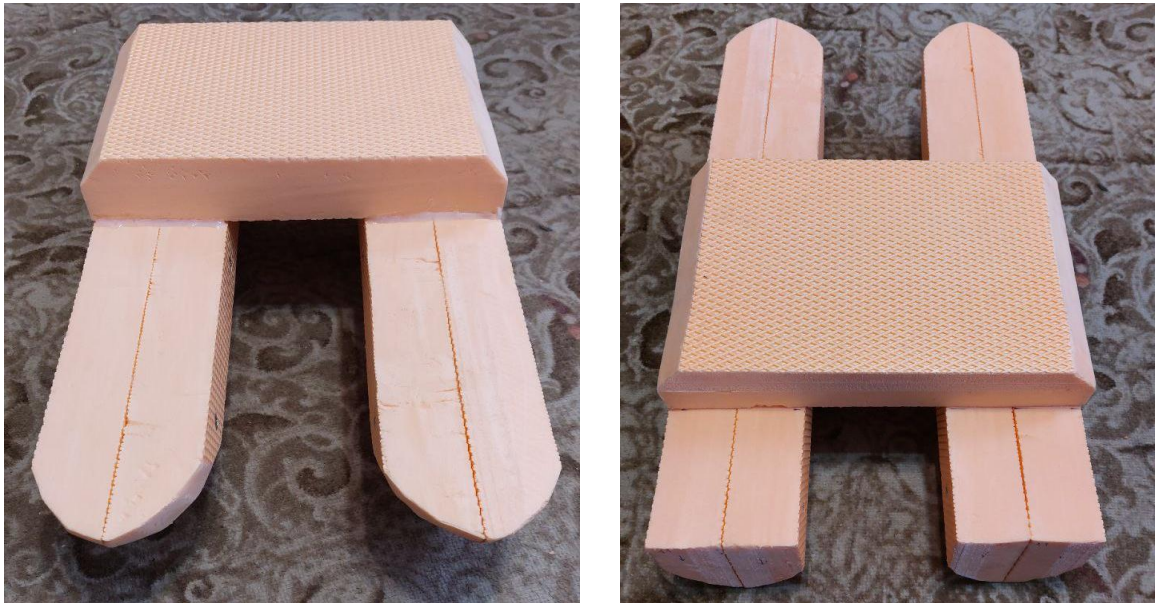


Рисунок 3.4 – Вирізані основні елементи макету

Вирізання виконувалось канцелярським ножом з дотриманням рівних ліній та заокругленням передніх країв поплавків для зменшення опору у воді. Усі частини було з'єднано між собою гарячим клеєм, оброблені наждачним папером, а також для надійності поплавки були скручені шурупами.

На передньому плані добре видно загальну форму катамаранної конструкції та платформу, встановлену поверх поплавків (рис. 3.5, а). Зі зворотного боку можна побачити місця, які відведено під кріплення моторів та рульового механізму (рис. 3.5, б).



а)

б)

а) вид конструкції спереду;

б) вид конструкції ззаду

Рисунок 3.5 – Склеєна базова конструкція корпусу робота

Рульовий механізм робота складається з двох кермових пер, виготовлених з оцинкованого металу. Кожне перо закріплене на металевому пруті діаметром 2 мм. Для надійності кріплення поверхні металевих елементів були попередньо знежирені, після чого з'єднання додатково було посилено за допомогою гарячого клею. Така конструкція забезпечує міцність, стійкість до впливу води та достатню керованість. Загальний вигляд виготовлених кермових пер показано на рисунку 3.6.



Рисунок 3.6 – Кермові пера рульового механізму

Керування поворотом пера здійснюється за допомогою сервопривода, розташованого зверху на платформі поплавка. З'єднання серводвигуна з металевим прутком виконано за допомогою вигнутого важеля, що забезпечує передачу зусилля. Для зменшення люфтів та закріплення тяги, використано додаткові фіксатори з пінополістиролу, що утворюють напрямні вузли (рис. 3.7).

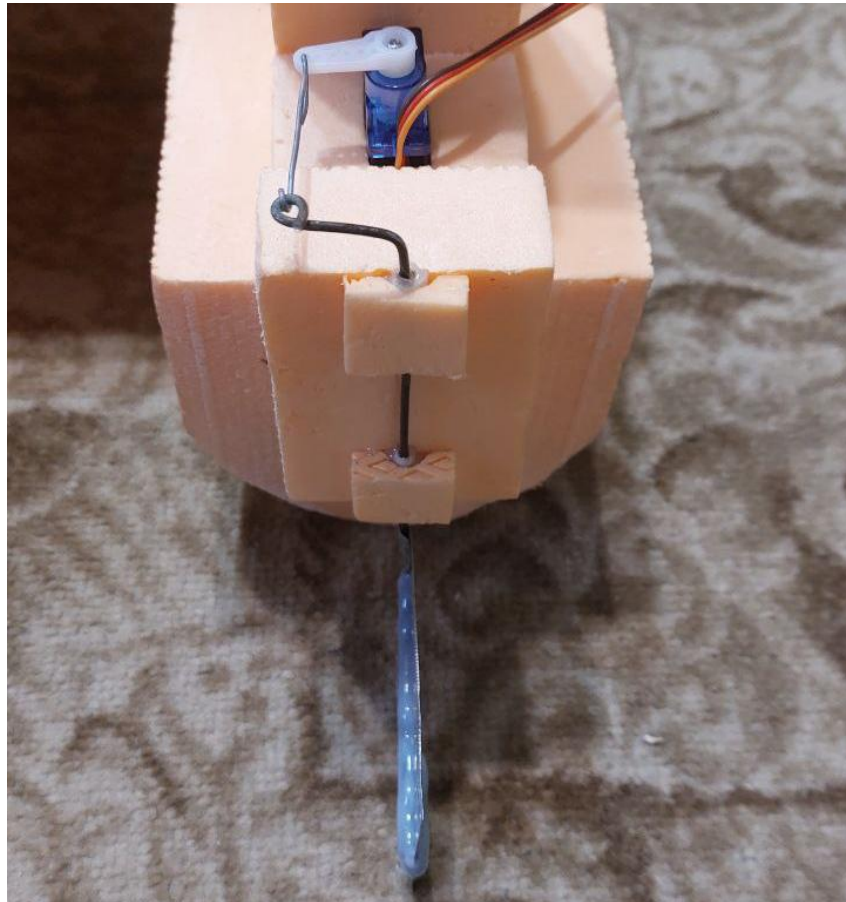


Рисунок 3.7 – Вигляд рульового механізму

Загальний вигляд усього рульового механізму та приклеєних основ для кріплення двигунів представлено на рисунку 3.8.

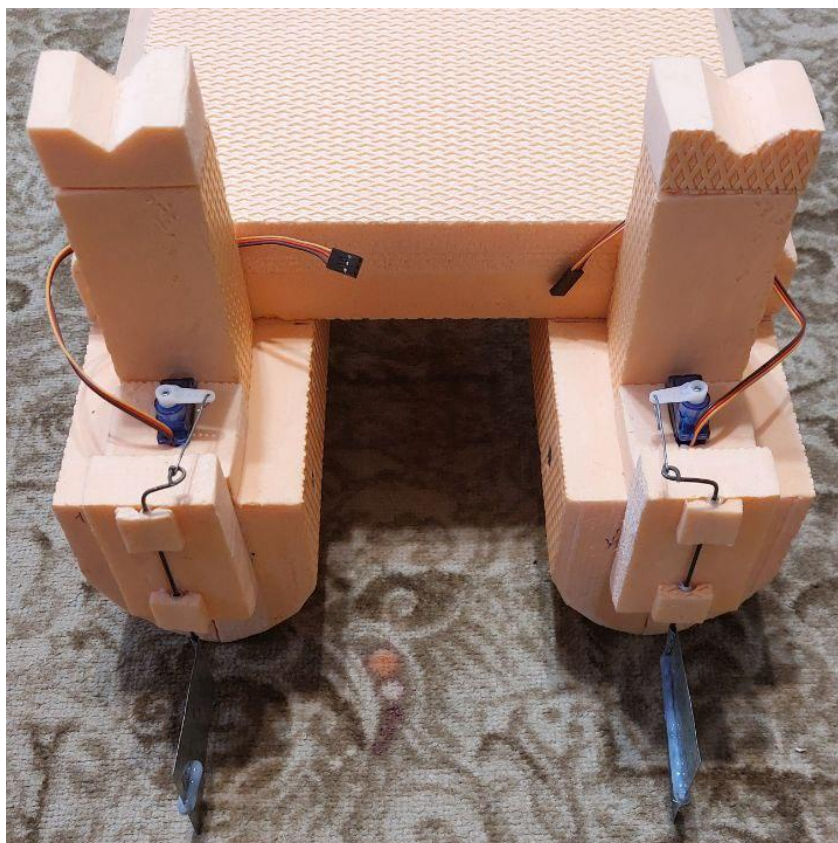


Рисунок 3.8 – Елементи кормової частини робота

Для забезпечення просторового орієнтування надводного робота було передбачено встановлення трьох ультразвукових датчиків по одному спереду, зліва та справа. Датчики закріплювалися на індивідуальних тримачах, виготовлених із пінополістиролу. Кожен тримач було приклеєно гарячим клеєм до верхньої частини платформи. Для правильного функціонування сенсорів важливо було витримати горизонтальне розташування модулів і забезпечити вільний простір перед ними, щоб уникнути хибних вимірювань.

Для розміщення модуля ESP32-CAM було виготовлено корпус із пінополістиролу, який забезпечує фіксацію плати та захист від механічних пошкоджень. Корпус вирізано вручну з дотриманням габаритів модуля, що дозволяє вставити плату без люфтів.

Цей корпус прикріплений до сервоприводу, що забезпечує можливість повороту камери в горизонтальній площині для огляду простору перед роботом. Серводвигун, у свою чергу, закріплений на монтажній платформі з пінополістиролу, що приклеєна до верхньої частини платформи робота.

Зовнішній вигляд кріплень ультразвукових датчиків та камери ESP32-CAM на платформі робота показано на рисунку 3.9.

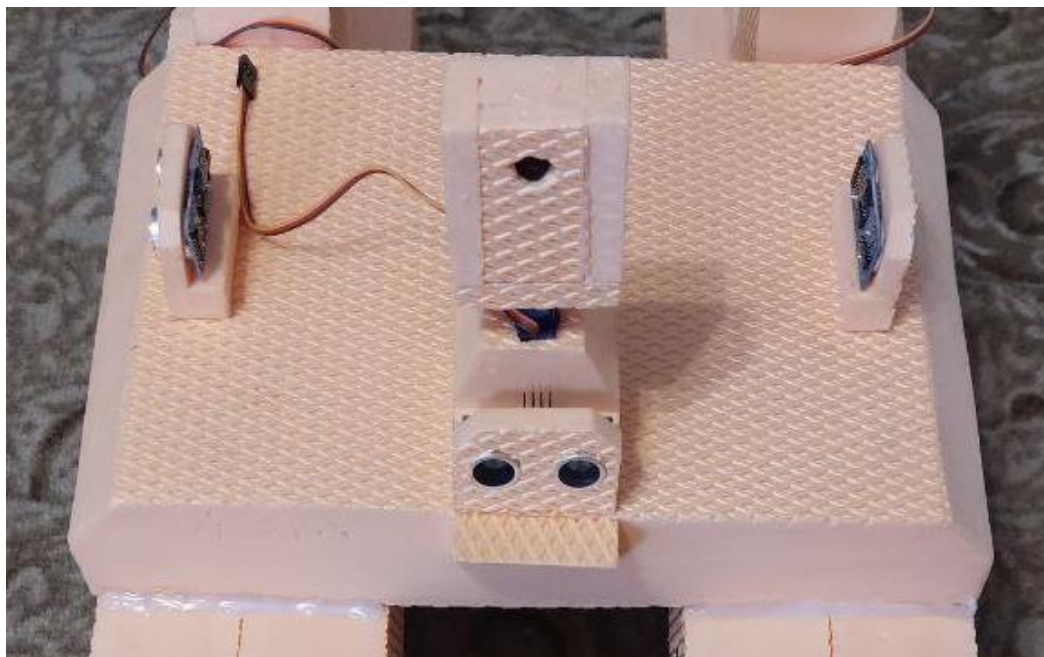


Рисунок 3.9 – Кріплення ультразвукових датчиків та камери ESP32-CAM

Для покращення стабільності сигналу бездротового з'єднання модуль ESP32-CAM було оснащено зовнішньою антеною. Конектор антени закріплено на оцинкованій металевій пластині, яка, у свою чергу, прикріплена до вертикальної щогли, виготовленої з пінополістиролу. Такий варіант кріплення, дозволив підняти антену вище відносно центральної платформи, для покращення прийому сигналу.

Механізм підйому ехолота складається з серводвигуна, закріпленого на пінополістирольному кронштейні в задній частині платформи. Серводвигун з'єднаний з рухомим важелем, у вигляді металевого кільця та повідця з рибальської волосіні діаметром 0,3 мм, до якого прикріплено утримувач ехолота. Обертання вала серводвигуна в заданому діапазоні забезпечує вертикальне переміщення ехолота, дозволяючи опускати його у воду для вимірювань та піднімати у вихідне положення.

Зовнішній вигляд механізму підйому ехолота показано на рисунку 3.10, а, кріплення зовнішньої антени наведено на рисунку 3.10, б.



а)



б)

а) кріплення зовнішньої антени; б) механізм підйому ехолота

Рисунок 3.10 – Зовнішній вигляд механізму підйому ехолота та кріплення зовнішньої антени

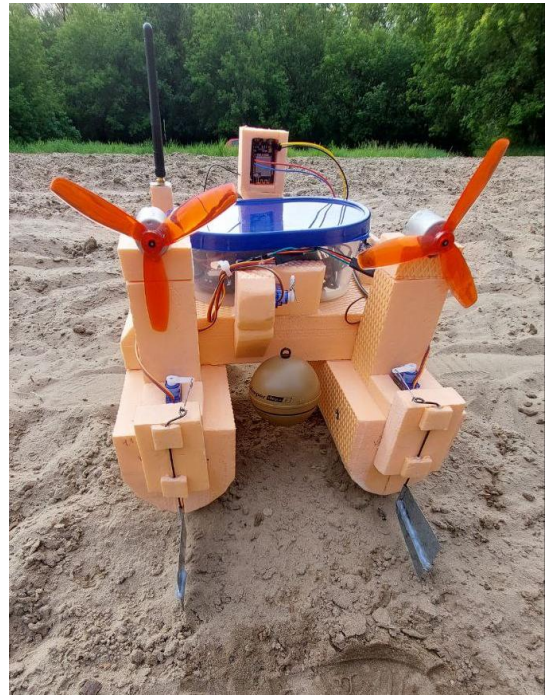
На завершальному етапі складання макету вся електроніка була змонтована згідно з принциповою схемою, наведеною у підрозділі 2.3. Компоненти було надійно спаяно та з'єднано між собою, після чого розміщено в герметичному пластиковому контейнері, для забезпечення захисту від вологи та механічних пошкоджень під час експлуатації на воді. Мотори з пропелерами було встановлено на монтажні основи, показані на рисунку 3.8.

Готовий макет надводного робота після остаточного складання, встановлення електроніки та кріплення всіх компонентів, зображено вид спереду на рисунку 3.11, а, а вид ззаду на рисунку 3.11, б.



а)

а) зовнішній вигляд макету спереду;



б)

б) зовнішній вигляд макет ззаду

Рисунок 3.11 – Готовий макет надводного робота

### 3.3 Розроблення програми керування

Функцію дистанційного керування надводним роботом, відповідно до схеми підключення, яка була представлена у підрозділі 2.3, реалізовано на базі двох основних електронних компонентів: ESP32-CAM та ESP32 DevKit V1.

ESP32-CAM виконує роль центрального модуля керування та відеоспостереження системи. Забезпечуючи захоплення відео з камери, вона створює Wi-Fi точку доступу, запускає веб-сервер з інтерфейсом керування та передає команди на ESP32 DevKit V1 через послідовний порт, а також отримує дані від ультразвукових датчиків.

ESP32 DevKit V1 відповідає за фізичне керування роботом – отримує команди від ESP32-CAM та керує моторами для руху, сервоприводами для позиціонування камери, рульового механізму та ехолоту, а також опрацьовує дані з датчиків.

Такий підхід дозволяє оператору керувати роботом через будь-який пристрій з веб-браузером, спостерігаючи за навколишнім середовищем в режимі реального часу за допомогою вбудованої камери.

Програмне забезпечення для обох мікроконтролерів було розроблено в середовищі Arduino IDE, яке попередньо було налаштоване для роботи з модулями ESP32, зокрема встановлено відповідні плати, бібліотеки та параметри компіляції.

Повний лістинг написаної програми для ESP32-CAM наведено у Додатку Б. При написанні програми для ESP32-CAM, першим кроком було підключено всі необхідні бібліотеки.

Фрагмент коду програми, у якому підключено бібліотеки:

```
#include "esp_camera.h"
#include <Arduino.h>
#include <WiFi.h>
#include <AsyncTCP.h>
#include <ESPAsyncWebServer.h>
```

Бібліотека `esp_camera.h` забезпечує ініціалізацію та керування камерою ESP32-CAM, `Arduino.h` надає базові функції для роботи з пінами, серійним портом та іншими апаратними компонентами мікроконтролера, `WiFi.h` відповідає за створення WiFi з'єднання, `ESPAsyncWebServer.h` реалізує асинхронний веб-сервер для обробки HTTP-запитів і відправки веб-інтерфейсу користувачу, `AsyncTCP.h` підтримує асинхронні TCP-з'єднання, забезпечуючи стабільну роботу веб-сервера для кількох клієнтів.

Далі було оголошено такі змінні:

- `FLASH_LED_PIN 4`, що вказує на пін, до якого підключений світлодіод спалаху;

- змінні `frontDistance`, `leftDistance`, `rightDistance` типу `float` зберігають останні отримані значення відстаней від датчиків, а `lastSensorUpdate` типу `unsigned long` фіксує час останнього оновлення цих даних;

– блок Camera GPIO Configuration визначає номери пінів, до яких підключена камера, що є важливим для коректної ініціалізації та роботи камери.

Додатково були оголошені константи зміщення датчиків: FRONT\_SENSOR\_OFFSET зі значенням 27 см визначає зміщення переднього датчика від носової частини робота; LEFT\_SENSOR\_OFFSET та RIGHT\_SENSOR\_OFFSET зі значенням 3 см кожна визначають зміщення бокових датчиків від відповідних країв корпусу робота. Ці константи необхідні для корекції показань датчиків, щоб отримувати реальну відстань від країв робота до перешкод, а не від самих датчиків.

Для системи індикації перешкод були оголошені додаткові змінні frontWarningShown, leftWarningShown, rightWarningShown типу bool для відстеження стану попереджень, константа SAFE\_DISTANCE зі значенням 200 см визначає межу безпечної відстані для зеленого діапазону від 400 до 200 см, константа WARNING\_DISTANCE зі значенням 100 см встановлює межу попереджувальної відстані для жовтого діапазону від 200 см до 100 см, а червоний критичний діапазон охоплює відстані від 100 до 0 см.

Для створення точки доступу Wi-Fi, яку створюватиме робот, було створено ім'я мережі та її пароль:

```
const char* ssid = «MyWaterRobot»;
```

```
const char* password = «12345678»;
```

За створення асинхронного веб-сервера відповідають наступні рядки:

```
AsyncWebServer server(80);
```

Далі було створено HTML-сторінку інтерфейсу керування:

```
const char* htmlHomePage PROGMEM = R»HTMLHOMEPAGE(
```

```
<!DOCTYPE html>
```

```
// ... HTML-код інтерфейсу
```

```
)HTMLHOMEPAGE»;
```

HTML-сторінка, збережена в змінній htmlHomePage, створює веб-інтерфейс для керування роботом і відображення даних. Угорі сторінки

розміщений заголовок «Надводний Робот». Під ним розташована область для виведення відеопотоку з камери. Далі йде панель сенсорів, яка відображає відстані до найближчих перешкод зліва, спереду і справа. У кожній панелі в правому верхньому куті розміщено круглий індикатор стану з кольоровим маркуванням рівня безпеки, а внизу горизонтальний прогрес-бар. CSS-стили `status-indicator` відповідають за відображення кольорових кружечків з анімацією миготіння для попереджувальних і критичних станів. Стили `safety-indicator` та `safety-bar` формують горизонтальні смужки з градієнтним забарвленням і анімаціями `warningPulse` і `dangerPulse`, що надають динамічності відображенню рівнів небезпеки.

Під панеллю сенсорів розташовані кнопки для руху робота вперед, назад, вліво та вправо. Кнопка стоп у центрі зупиняє рух. Ці кнопки активуються при натисканні і зупиняються при відпусканні. Під кнопками розташовані слайдери, які розміщені один під одним, для налаштування повороту камери в діапазоні від  $0^\circ$  до  $180^\circ$ , опускання ехолота від  $0^\circ$  до  $180^\circ$  і швидкості від 0 до 255, які відправляють відповідні команди при зміні значень. JavaScript у HTML-сторінці забезпечує виконання таких функцій: функція `sendCommand` надсилає команди, наприклад «MoveRobot,1», функція `updateSensorData` оновлює дані сенсорів кожні 500 мілісекунд та автоматично викликає функцію `updateSafetyIndicator` для кожного з трьох ультразвукових датчиків, забезпечуючи відображення стану безпеки в реальному часі, при цьому значення відстаней округлюються до цілих чисел за допомогою `Math.round()` для покращення читабельності інтерфейсу, а `refreshCameraImage` оновлює зображення камери кожні 200 мілісекунд з додаванням часової мітки до адреси для запобігання кешуванню браузером старих кадрів.

За обробку даних про відстань до перешкод, які передаються з ESP32 DevKit v1, відповідає функція `parseSensorData(String data)`. Вона очікує дані у форматі «SENSORS,front,left,right», наприклад, «SENSORS,25.3,30.1,15.7». Функція виділяє з рядка значення відстаней та оновлює глобальні змінні `frontDistance`, `leftDistance`, `rightDistance`, а також `lastSensorUpdate`. Після

аналізу даних відбувається корекція показань шляхом віднімання відповідних зміщень з використанням функції `std::max()`, що гарантує, що скориговані значення не будуть від'ємними. Після оновлення значень відстаней функція автоматично викликає `checkAndPrintCompactWarnings`, яка перевіряє критичні відстані для всіх трьох датчиків відповідно до заданих діапазонів безпеки та формує компактне повідомлення про статус у форматі «STATUS: F:CRIT L:WARN R:CRIT» з використанням скорочень F для переднього датчика, L для лівого, R для правого, CRIT для критичного стану та WARN для попередження, виводячи сповіщення тільки при наявності небезпечних ситуацій.

За надсилання команд на плату ESP32 DevKit v1 через послідовний порт Serial1 відповідає функція `sendRobotCommands(String inputCommand)`:

```
void sendRobotCommands(String inputCommand) {
    Serial.println(«Sending to Dev Kit: « + inputCommand);
    Serial1.println(inputCommand); // Відправляємо команди на Serial1
    (ESP32 DevKit v1) }
```

Функції `handleRoot`, `handleControl`, `handleSensorData`, `handleCameraCapture`, `handleNotFound` є обробниками HTTP-запитів. Вони скеровують вхідні запити від веб-браузера до відповідної логіки сервера, аналізуючи URL-адресу, за якою надійшов запит, і визначаючи, яку дію необхідно виконати.

`HandleRoot` обробляє запит до кореневого URL (`/`) і відправляє клієнту всю HTML-сторінку (`htmlHomePage`).

`HandleControl` обробляє запити до `/control`. Вона отримує параметри `command` та `value` з URL-адреси (наприклад, `/control?command=MoveRobot&value=1`), формує з них повну команду (наприклад, «MoveRobot,1») і передає її функції `sendRobotCommands` для відправки на ESP 32 DevKit v1.

`HandleSensorData` обробляє запити до `/sensor_data`. Вона формує JSON-рядок, що містить поточні значення `frontDistance`, `leftDistance` та `rightDistance`,

і відправляє його клієнту. Це дозволяє веб-сторінці динамічно оновлювати показання датчиків.

`HandleCameraCapture` обробляє запити до `/camera_feed`. Ця функція робить знімок з камери (`esp_camera_fb_get()`), перевіряє, чи успішний знімок, і якщо так, відправляє отримане JPEG-зображення оператору. Якщо знімок не вдався, повертає помилку та `esp_camera_fb_return(fb)` звільняє буфер камери після використання.

`HandleNotFound` обробляє будь-які запити до URL-адрес, для яких не визначено інших обробників, повертаючи помилку «File Not Found» (файл не знайдено).

Функція `setupCamera()` відповідає за ініціалізацію та налаштування камери ESP32-CAM. Вона конфігурує GPIO-піни, частоту тактового сигналу, формат і розмір кадру (JPEG, SVGA), якість зображення та кількість буферів для знімків. Після успішної ініціалізації вона також налаштовує параметри датчика камери, такі як яскравість, контраст, насиченість та баланс білого, для встановлення якості зображення.

Функція `setup()` виконується один раз при старті плати ESP32-CAM. Вона ініціалізує послідовні порти (`Serial` для налагодження та `Serial1` для зв'язку з ESP32 DevKit v1), причому `Serial1` налаштовується зі швидкістю 115200 бод, форматом 8N1 з використанням піна 3 для прийому (RX) та піна 1 для передачі (TX), які підключаються до GPIO17 та GPIO16 ESP32 DevKit v1 відповідно, налаштовує пін світлодіода спалаху, переводить ESP32-CAM у режим точки доступу Wi-Fi (WiFi.softAP) з заданим ім'ям та паролем. Далі вона встановлює маршрути для веб-сервера (`server.on`) та запускає його (`server.begin()`), після чого ініціалізує камеру за допомогою `setupCamera()`.

При завантаженні веб-сторінки в функції `window.onload` автоматично відправляються початкові значення всіх слайдерів (швидкість, панорамування та нахил) для синхронізації інтерфейсу з фактичним станом робота.

Функція `loop()` виконується безперервно після `setup()`. Вона постійно перевіряє наявність даних у послідовному порту `Serial1`, зчитує їх і, якщо це

дані датчиків, викликає `parseSensorData()` для їх обробки. В іншому випадку, отримані дані виводяться в консоль. Також `loop()` дозволяє вам вводити команди у послідовний монітор комп'ютера, які потім перенаправляються на ESP32 DevKit v1 через Serial1 для налагодження.

Повний лістинг написаної програми для ESP32 DevKit v1 наведено у Додатку В. Як і для ESP32-CAM, так і для ESP32 DevKit v1 на початку коду підключаються необхідні бібліотеки:

```
#include <vector>
#include <iostream>
#include <sstream>
#include <ESP32Servo.h>
```

`Vector`, `iostream`, `sstream` це стандартні бібліотеки C++ для роботи з динамічними масивами, вводом/виводом та рядковими потоками відповідно. `ESP32Servo.h` відповідає за керування серводвигунами.

Далі визначені піни для трьох ультразвукових датчиків: переднього (`TRIGGER_PIN_FRONT`, `ECHO_PIN_FRONT`), лівого (`TRIGGER_PIN_LEFT`, `ECHO_PIN_LEFT`) та правого (`TRIGGER_PIN_RIGHT`, `ECHO_PIN_RIGHT`).

Крім того, визначені піни для сервопривода повороту камери (`PAN_SERVO_PIN`), сервопривода опускання ехолота (`TILT_SERVO_PIN`), а також двох сервоприводів рульового керування (`STEERING_SERVO1_PIN`, `STEERING_SERVO2_PIN`). Макроси `UP`, `DOWN`, `LEFT`, `RIGHT` і `STOP` задають напрямки руху, а константи `RIGHT_MOTOR`, `LEFT_MOTOR`, `FORWARD` і `BACKWARD` визначають конфігурацію двигунів.

Далі створено глобальні змінні для зберігання даних. Змінні `frontDistance`, `leftDistance` і `rightDistance` типу `float` зберігають відстані від сенсорів, а `lastDistanceMeasurement` типу `unsigned long` фіксує час останнього вимірювання. Константа `MAX_DISTANCE` обмежує максимальну відстань для ультразвукових сенсорів у 400 см, а `MEASUREMENT_INTERVAL` визначає періодичність вимірювань у 500 мс.

Структура `MOTOR_PINS` містить піни для двигунів (`pinIN1`, `pinIN2`,

pinEn, pwmSpeedChannel), а масив motorPins зберігає конфігурацію для правого і лівого двигунів. Змінна currentSpeed зі значенням 150 задає початкову швидкість двигунів, а PWMFreq (1000 Гц) і PWMResolution (8 біт) налаштовують ШІМ для двигунів.

Оголошені об'єкти Servo (panServo, tiltServo, steeringServo1, steeringServo2) керують відповідними сервоприводами.

Функція measureDistance(int trigPin, int echoPin) відповідає за вимірювання відстані за допомогою одного ультразвукового датчика. Вона генерує ультразвуковий імпульс на trigPin, потім вимірює час, за який імпульс повертається на echoPin, та обчислює відстань у сантиметрах. Затримки (delayMicroseconds) та таймаут (timeout) використані для підвищення точності вимірювань. Результат обмежується в діапазоні від 2 см до MAX\_DISTANCE.

Функція measureAllDistances() послідовно викликає measureDistance для кожного з трьох датчиків (переднього, лівого, правого) з невеликими затримками по 50 мілісекунд між вимірюваннями для запобігання взаємних перешкод між датчиками. Після отримання всіх даних вона виводить їх у послідовний порт для налагодження та викликає sendSensorDataToCAM().

Функція sendSensorDataToCAM() формує рядок з поточними значеннями frontDistance, leftDistance, rightDistance у спеціальному форматі «SENSORS,front,left,right» (наприклад, «SENSORS,25.3,30.1,15.7») та надсилає його на ESP32-CAM через послідовний порт Serial1. Це дозволяє ESP32-CAM оновлювати веб-інтерфейс з актуальними даними від датчиків.

Функція testIndividualSensors() призначена для тестування окремих датчиків. Вона виконує по три вимірювання для кожного датчика та виводить результати у послідовний порт для перевірки їх працездатності.

Функція rotateMotor(int motorNumber, int motorDirection) керує обертанням одного двигуна. Вона приймає номер двигуна (правий або лівий) та напрямок (вперед, назад, стоп). Залежно від напрямку, вона встановлює відповідні рівні на пінах pinIN1 та pinIN2 для зміни напрямку обертання та використовує ledcWrite для керування швидкістю двигуна через ШІМ-сигнал.

Функція `setSteeringPosition(int position)` задає позицію сервоприводів лівого та правого керма (`steeringServo1` та `steeringServo2`) на заданий кут, встановлення у відповідне положення рульовий механізм.

Функція `processRobotMovement(int inputValue)` обробляє команди руху, отримані від ESP32-CAM. Вона використовує оператор `switch` для визначення команди (вперед, назад, вліво, вправо, стоп) та викликає відповідні функції `rotateMotor` та `setSteeringPosition` для керування двигунами та рульовими сервоприводами.

Функція `setUpPinModes()` виконує початкове налаштування всіх пінів. Вона ініціалізує піни ультразвукових датчиків (`TRIG` як вихід, `ECHO` як вхід), ініціалізує сервоприводи до відповідних пінів та встановлює їх початкові положення. Також вона налаштовує ШІМ для керування швидкістю двигунів, встановлюючи частоту та роздільну здатність, та прив'язує канали ШІМ до пінів керування двигунами.

Функція `setup()` виконується один раз при запуску плати ESP32 Dev Kit. Вона ініціалізує послідовний порт `Serial` для зв'язку з комп'ютером та `Serial1` для зв'язку з ESP32-CAM. `Serial1` налаштовується з параметрами 115200 baud, `SERIAL_8N1`, з використанням пінів 16 та 17 для RX та TX відповідно. Після цього вона викликає `setUpPinModes()` для налаштування всіх пінів, виконує затримку 1000 мс для стабілізації системи та `measureAllDistances()` для початкового вимірювання відстаней.

Функція `loop()` виконується безперервно після `setup()`. Вона постійно перевіряє час для періодичного вимірювання відстаней за допомогою `measureAllDistances()` (кожні 500 мс). Крім того, вона стежить за послідовним портом `Serial1` для отримання команд від ESP32-CAM.

Отримані команди (наприклад, «MoveRobot,1», «Speed,150», «Pan,90», «Tilt,0») аналізуються, і залежно від команди, викликаються відповідні функції для керування рухом, швидкістю, поворотом камери або опускання ехолота.

### 3.4 Результати роботи робота

Після остаточного складання надводного робота було проведено випробування у реальних умовах. Водним об'єктом під час проведення тестування була річка. Основна мета тестування полягала у перевірці ефективності керування через веб-інтерфейс, стійкості конструкції, ефективності переміщення по водному середовищу, працездатності рульового механізму, двигунів, камери, системи вимірювання відстаней до перешкод, а також проведенню дослідження водного об'єкта за допомогою ехолота.

Перед початком випробувань за допомогою кнопки живлення було увімкнено робота, після чого з мобільного телефону виконано підключення до створеної ESP32-CAM Wi-Fi мережі (рис. 3.12).

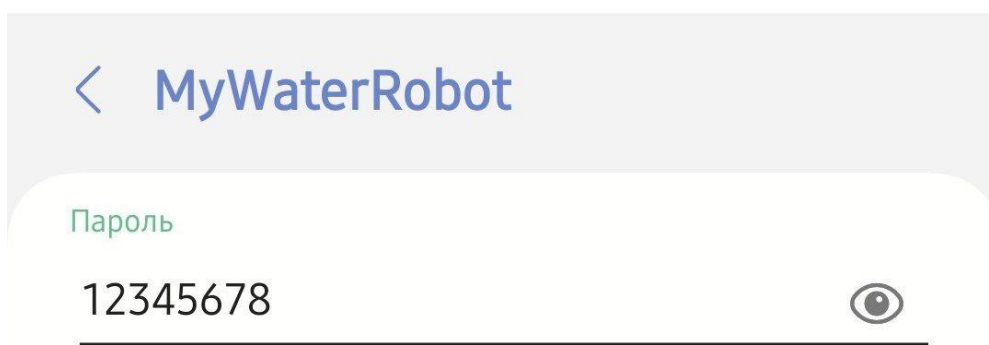
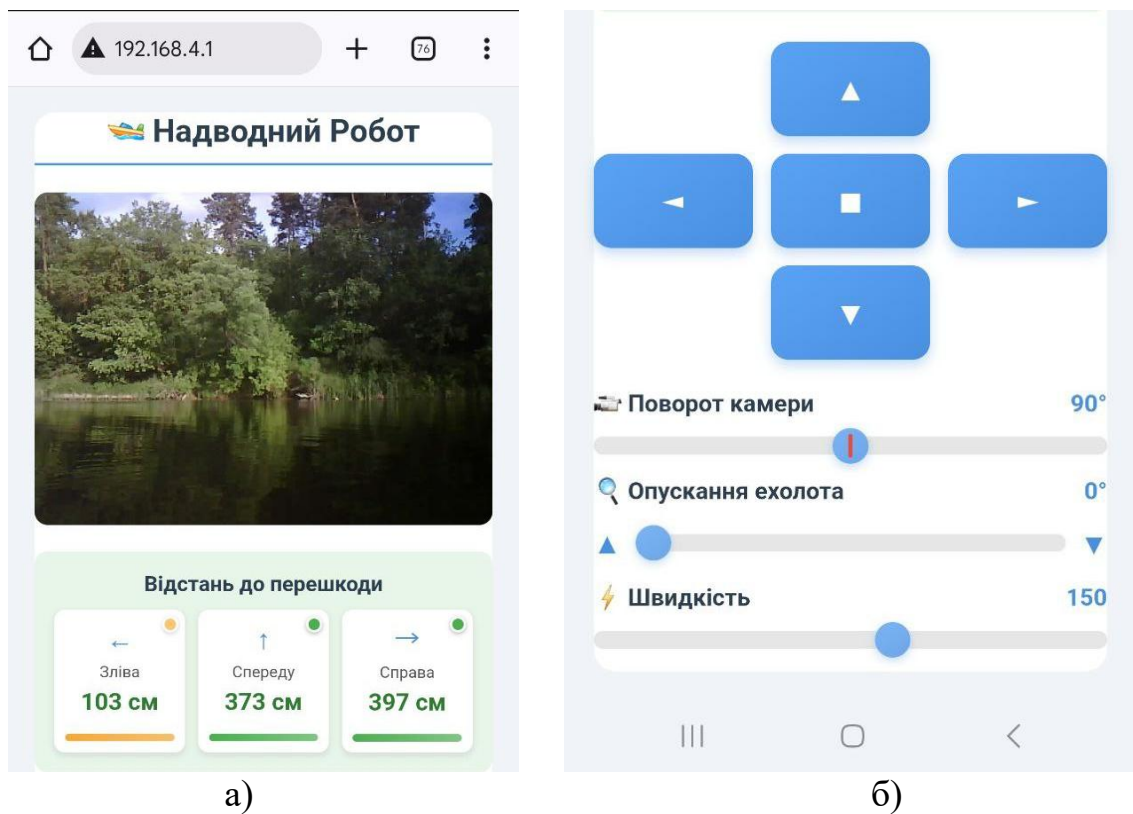


Рисунок 3.12 – Підключення до Wi-Fi мережі робота

У веб-браузері за адресою 192.168.4.1 було відкрито інтерфейс керування, для початку тестування основних функцій пристрою (рис. 3.13 а, та 3.13, б).



а)

б)

а) сторінка на початку; б) сторінка знизу

Рисунок 3.13 – Інтерфейс керування роботом

Із рисунка 3.13 видно, що після підключення до Wi-Fi мережі робота, за адресою 192.168.4.1 у веб-браузері було виведено інтерфейс, на якому видно трансляцію відеопотоку в режимі реального часу, інформаційну панель про виявлення перешкод та об'єктів у трьох напрямках та світлову індикацію, панель кнопок для керування рухом робота, слайдер для повороту камери на 180°, слайдер опускання ехолота, а також слайдер регулювання швидкості робота.

Після завантаження інтерфейсу було перевірено рух прямо, назад, повороти вліво та вправо.



Рисунок 3.14 – Результати тестування руху робота

Результати перевірки руху робота показали, що всі виконавчі механізми функціонують коректно, а швидкість і напрям руху відповідають заданим параметрам. Використання повітряного приводу, дозволило уникнути заплутування водоростей та іншої рослинності на винти, тим самим забезпечило безперешкодний рух. Осадження корпусу у воду становило близько 5 см, що забезпечило необхідний рівень занурення для нормального функціонування системи руху та проходження мілководдя.

Наступним тестом була перевірка на працездатність ультразвукових датчиків, які розташовані спереду, справа та зліва на центральній платформі робота, та повинні інформувати оператора про наявність та відстань до найближчої перешкоди чи об'єкта. При виявленні найближчої перешкоди чи об'єкта, на інтерфейсі у спеціальному полі, яке розділено по напрямках, виводиться значення відстані та за допомогою кольорового сигналу,

відбувається попередження про перешкоду поблизу робота. Це дає можливість оператору краще орієнтуватись у керування роботом на водному об'єкті, особливо коли ділянка є вузькою та захаращеною.

Результат тестування показано на рисунку 3.15.

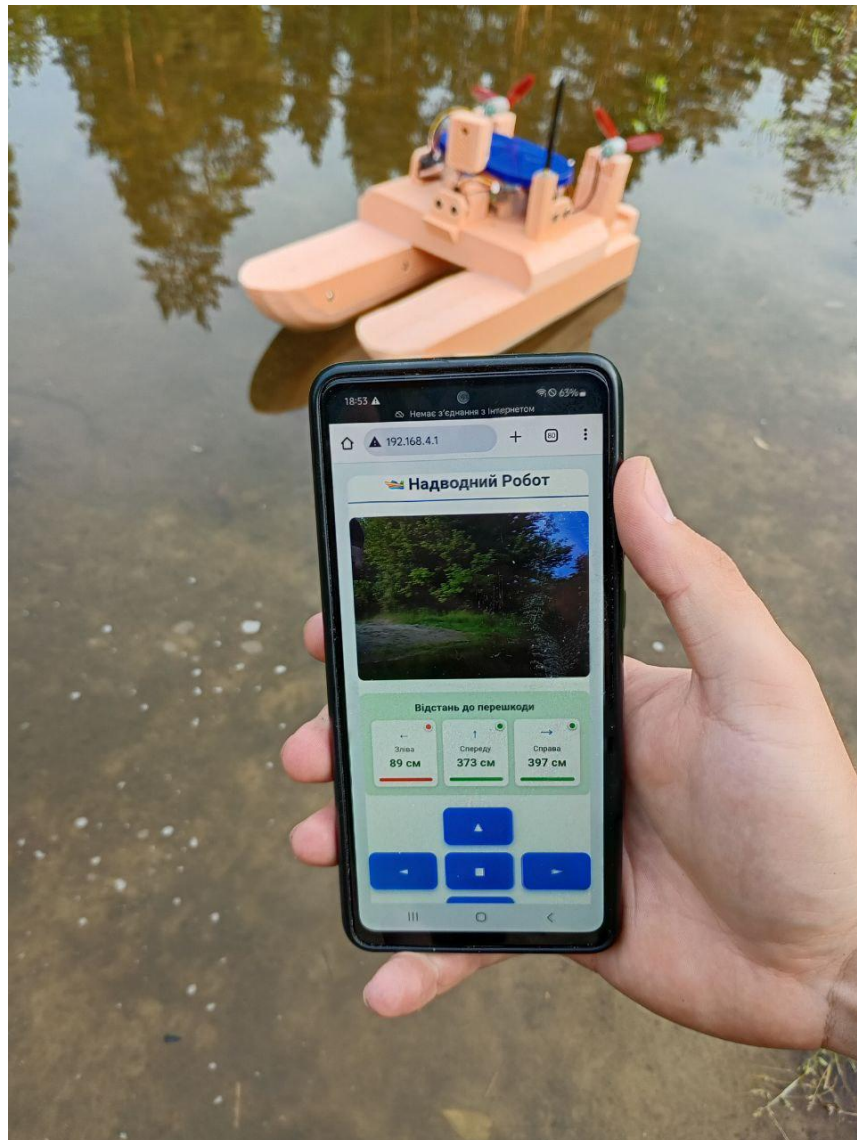


Рисунок 3.15 – Результати перевірки виявлення перешкод

Із рисунка 3.15 видно, що завдяки ультразвуковому датчику оператор має змогу бачити відстань від робота до найближчої перешкоди або об'єкта, в даному випадку, перешкодою була берегова лінія. Червоний індикатор сигналізує, що перешкоди менш ніж за метр від робота, а саме 89 см від лівого борту.

Після тестування основних функцій було перевірено механізм повертання камери в діапазоні від  $0^\circ$  до  $180^\circ$ . Результати перевірки наведено на рисунку 3.16.

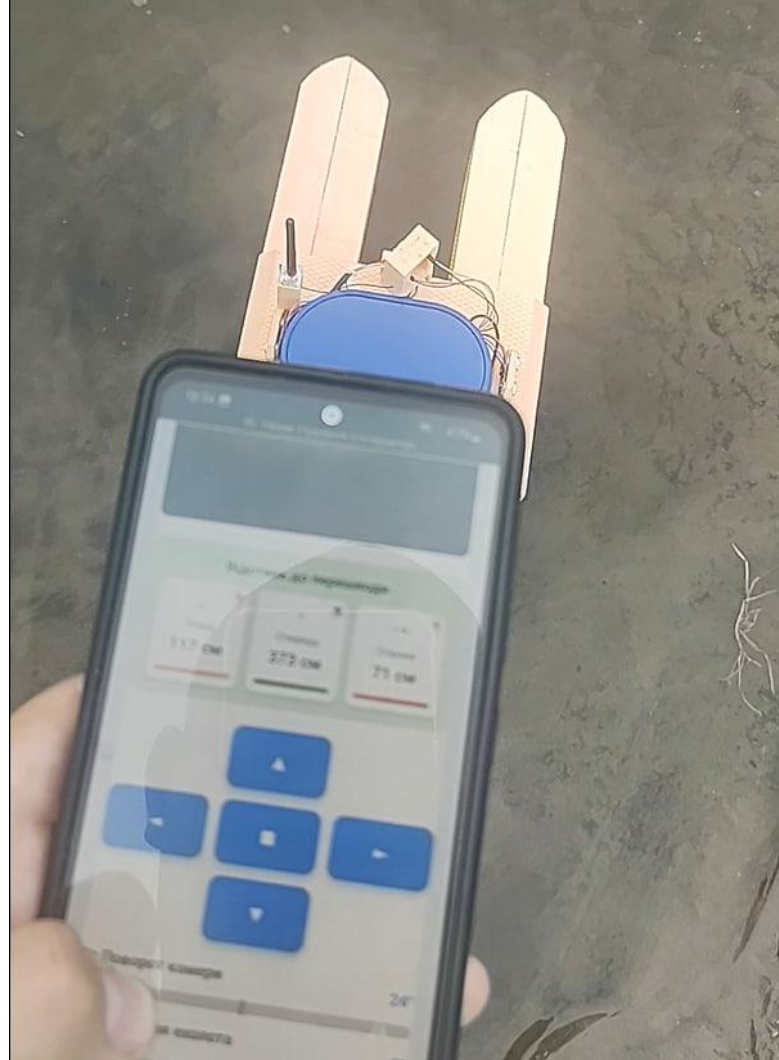


Рисунок 3.16 – Перевірка механізму повороту камери

Із рисунка 3.16 видно, що механізм працює та забезпечує повертання камери, що дає змогу розширити поле зору робота, здійснювати огляд у різних напрямках та точніше виявляти об'єкти чи перешкоди в зоні дії.

На останок, було виконано дослідження водного об'єкта за допомогою обраного ехолоту. За допомогою спеціального слайдера на інтерфейсі керування, ехолот було опущено, щоб він доторкнувся до води та почав передавати дані.

Після цього на мінімальній швидкості руху, яка була задана відповідним слайдером на інтерфейсі, було виконано рух, по маршруту який треба було дослідити. Результат дослідження показано на рисунку 3.17.



Рисунок 3.17 – Результат дослідження водного об’єкта

Із рисунка 3.17 видно, що рух на мінімальній швидкості дозволив більш детально дослідити рельєф дна водойми та виявити наявність окремих об’єктів під водою. Крім того, використання повітряного приводу, зменшило рівень шуму у воді, що дозволило краще дослідити водний об’єкт, не відлякуючи водну фауну. У верхній частині екрана показано температуру води на рівні 22 °С, заряд сонара та GPS-позиціювання з точністю 0,1 м. Радіальна сітка інтерфейсу дозволяє швидко оцінити розташування об’єктів на відстані до 90 метрів.

У нижній частині зображено сигнал від ехолота, а саме чітко простежується рельєф дна, відображений у червоно-коричневих тонах, а також виявлено об'єкт, імовірно рибу, на глибині близько 0,8 м. Масштаб глибини праворуч дозволяє оцінити вертикальний профіль до 1,5 м, де видно межу між товщею води та дном. Зелені й червоні відтінки на цій межі відображають наявність водоростей або інших структур дна, у тому числі й корчів.

### 3.5 Охорона праці

У процесі розроблення, складання та тестування макету надводного робота важливим є забезпечення безпечних умов праці та дотримання вимог чинного законодавства у сфері охорони праці. Основна мета заходів з охорони праці є зниження ризиків виробничого травматизму, попередження аварійних ситуацій та створення комфортних умов для роботи з електронними компонентами, комп'ютерною технікою та механічними вузлами.

Враховуючи, що проектування здійснюється в лабораторних або домашніх умовах, ризики обмежуються електротехнічними та механічними небезпеками, пов'язаними з інструментами та приладами, а також психофізіологічними факторами.

У процесі роботи з макетом надводного робота можна виділити наступні потенційно небезпечні фактори:

- електричне ураження, яке пов'язане з використанням джерел живлення (Li-ion акумулятори, мережеві блоки живлення), підключенням та випробуванням електронних схем;

- пожежна небезпека при неправильному поводженні з акумуляторами, короткому замиканні, перевантаженні провідників.

- травмонебезпечні ситуації під час роботи з ріжучими інструментами, нагрівальними елементами (паяльник, термопістолет), рухомими деталями (двигуни, гвинти);

– психофізіологічні фактори, такі як перенапруження зору, статичне навантаження, тривала робота за комп'ютером.

Розглянемо засоби захисту та техніку безпеки.

Для уникнення електротравм необхідно використовувати джерела живлення з вихідною напругою не вище 12 В; перед виконанням монтажу або демонтажу компонентів обов'язково відключати живлення; перевіряти ізоляцію дротів та з'єднань; не використовувати несправні акумулятори або елементи з пошкодженим корпусом.

Для дотримання пожежної безпеки під час роботи слід не залишати без нагляду зарядні пристрої для акумуляторів; уникати перевантаження провідників; зберігати легкозаймисті матеріали на відстані від нагрівальних елементів; мати під рукою первинні засоби пожежогасіння (вогнегасник, пісок).

Для захисту від механічних пошкоджень, працюючи з інструментами, необхідно використовувати лише справний інструмент; надягати захисні рукавички при роботі з ріжучими предметами; обмежити доступ до рухомих частин робота під час випробувань (захисні екрани, кожухи) [69].

Під час виконання розрахунків, програмування та розробки електроніки значна частина часу проводиться за комп'ютером. Рекомендується:

– дотримуватись режиму праці та відпочинку, тому необхідно робити перерву від 5 до 10 хв кожні 45–60 хв;

– забезпечити відповідне освітлення робочого місця (не менше 300 лк);

– використовувати ергономічне крісло та зручне розміщення монітора (на рівні очей);

– провітрювати приміщення не рідше 2 разів на день [70].

При розробці важливо також враховувати екологічний аспект. Відпрацьовані елементи живлення (акумулятори) потрібно утилізувати відповідно до вимог. Не допускати потрапляння електронних компонентів, паяльного флюсу, смоли тощо в довкілля. Використовувати безсвинцевий припій для зменшення токсичності під час пайки [69].

## ВИСНОВКИ

В ході виконання кваліфікаційної роботи було проведено аналіз сучасного стану розробок у галузі мобільної робототехніки, зокрема надводних роботів, виявлено їх переваги та недоліки, а також досліджено наявні технічні рішення.

На основі аналізу обґрунтовано вибір компонентів, включно з мікроконтролером ESP32, модулем ESP32-CAM, ультразвуковими датчиками, сервоприводами, електродвигунами з драйвером керування, ехолотом та елементами живлення. Розроблено структурну схему роботи та схему підключення компонентів, виконано розрахунок часу роботи від обраного акумулятора.

Крім того, було побудовано алгоритм роботи програми. Розроблено веб-інтерфейс та програмне забезпечення, що реалізує логіку керування двигунами, передачу відеопотоку, збору та передачі даних з датчиків. Було розроблено макет роботи, для реалізації якого було використано обрані компоненти.

На завершальному етапі було проведено тестування макету в реальних умовах на водному об'єкті. Експеримент підтвердив працездатність усіх систем роботи, стабільність керування через веб-інтерфейс, ефективність виявлення перешкод та успішне дослідження дна водойми з детальним відображенням рельєфу та виявленням підводних об'єктів. Осадження корпусу близько 5 см забезпечило безпечне проходження мілководдя, достатню стійкість платформи на воді без втрати маневреності, а керованість залишалася на високому рівні навіть при змінних умовах середовища. Використання повітряного приводу в конструкції дозволило уникнути намотування водоростей та іншої рослинності, що позитивно вплинуло на безперервність руху та зменшення ризику його блокування.

## ПЕРЕЛІК ДжЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. ДСТУ 3008: 2015. Інформація та документація. Звіти у сфері науки і техніки. Структура і правила оформлення. К.: ДП «УкрНДНЦ». 2016. 30 с.
2. Методичні вказівки з підготовки кваліфікаційної роботи для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти денної і заочної форми навчання спеціальності 151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології освітньої [Електронний ресурс] / упоряд.: І. Ш. Невлюдов, О. І. Филипенко, О. В. Токарева, С. П. Новоселов, О.В Сичова ; М-во освіти і науки України, Харків. нац. ун-т радіоелектроніки. – електрон. вид. – Харків : ХНУРЕ, 2023. – 64 с.
3. Автоматизація та Приладобудування («Automation and Development of Electronic Devices» ADED-2025) [Електронний ресурс] : збірник студентських наукових статей / Харківський національний університет радіоелектроніки ; [редкол.: І.Ш. Невлюдов та ін.]. – Харків : ХНУРЕ, 2025. – Вип. 1. – 262с.
4. ISO 8373:2021 [Electronic resource]. – Mode of access: <https://www.iso.org/standard/75539.html>. – Title from screen.
5. Невлюдов І.Ш., Євсєєв В.В., Максимова С.С. ВЕАМ робототехніка: Навчальний посібник. – Oktan Print – Prague.: 2024.- 276 с. з мал..
6. Невлюдов І. Ш., Андрусевич А. О., Євсєєв В. В., Новоселов С. П., Демська Н. П. Проектування мобільних маніпуляційних роботів: Монографія. – Х.:, 2022. – 427 с.
7. Hanenko L. D. Analytical review of navigation issues of mobile robots in indoor environment [Electronic resource] / L. D. Hanenko, V. V. Zhebka // Telecommunication and information technologies. – 2023. – Vol. 80, no. 3. – Mode of access: <https://doi.org/10.31673/2412-4338.2023.038087>. – Title from screen.
8. Sánchez-Ibáñez J. R. Path planning for autonomous mobile robots: a review [Electronic resource] / José Ricardo Sánchez-Ibáñez, Carlos J. Pérez-del-Pulgar, Alfonso García-Cerezo // Sensors. – 2021. – Vol. 21, no. 23. – P. 7898. – Mode of

access: <https://doi.org/10.3390/s21237898>. – Title from screen.

9. Yépez-Ponce D. F., Salcedo-Romero-de-Ávila J.-V., Rosero-Montalvo P. D., Sanchís Saez J. Mobile robotics in smart farming: current trends and applications [Electronic resource] // *Frontiers in Artificial Intelligence*. – 2023. – Vol. 6. – Mode of access: <https://doi.org/10.3389/frai.2023.1213330>. – Title from screen.

10. Novotny G., Morales-Alvarez W., Smirnov N., Olaverri-Monreal C. Development of a ROS-Based Architecture for Intelligent Autonomous on Demand Last Mile Delivery // *Computer Aided Systems Theory – EUROCAST 2022*. – Cham: Springer Nature Switzerland, 2022. – P. 337–344. – (Lecture Notes in Computer Science; vol. 13789). – Title from screen.

11. Кириченко І. Наземні роботизовані комплекси: основи та майбутнє [Електронний ресурс] / Іван Кириченко // *Молодий вчений*. – 2021. – № 12 (100). – С. 16–20. – Режим доступу: <https://doi.org/10.32839/2304-5809/2021-12-100-4>. – Назва з екрана.

12. Jindal, K., Wang, A., Thakur, D., Zhou, A., Spurny, V., Walter, V., Broughton, G., Krajnik, T., Saska, M., & Loianno, G. (2021). Design and deployment of an autonomous unmanned ground vehicle for urban firefighting scenarios. *Field Robotics*, 1, 186–202.

13. Russo M. A survey on mechanical solutions for hybrid mobile robots [Electronic resource] / Matteo Russo, Marco Ceccarelli // *Robotics*. – 2020. – Vol. 9, no. 2. – P. 32. – Mode of access: <https://doi.org/10.3390/robotics9020032>. – Title from screen.

14. Струтинський В.Б., Гуржій А.М. : Монографія. – Житомир: ПП «Рута», 2023 . – 524 с.

15. Sudha, M., Patra, U. K., Sharma, N. V., Mathurkar, P., Kumaran, N., & Hemane, H. (2024). Drones in Agriculture: Revolutionizing Crop Monitoring and Spraying. *Frontiers in Health Informatics*, с. 907–914.

16. Pragati Jain. Medicine delivery drone [Electronic resource] / Pragati Jain // *International journal of engineering research and*. – 2020. – Vol. V9, no. 08. – Mode of access: <https://doi.org/10.17577/ijertv9is080100>. – Title from screen.

17. Grigore L. The use of drones in tactical military operations in the integrated and cybernetic battlefield [Electronic resource] / Laurențiu Grigore, Cristian Cristescu // Land forces academy review. – 2024. – Vol. 29, no. 2. – P. 269–273. – Mode of access: <https://doi.org/10.2478/raft-2024-0029>. – Title from screen.

18. Pons-Prats J. On the understanding of the current status of urban air mobility development and its future prospects: commuting in a flying vehicle as a new paradigm [Electronic resource] / Jordi Pons-Prats, Tanja Živojinović, Jovana Kuljanin // Transportation research part E: logistics and transportation review. – 2022. – Vol. 166. – P. 102868. – Mode of access: <https://doi.org/10.1016/j.tre.2022.102868>. – Title from screen.

19. Трет'як А.В. Основи робототехніки: навч. посіб. для студ. спец. 133 «Галузеве машинобудування», 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка» / А.В. Трет'як, А.М. Кльон. – Полтава : Нац. ун-т ім. Юрія Кондратюка», 2024. – 135 с.

20. DJI Mavic 3 [Electronic resource] // DJI. – Mode of access: <https://www.dji.com/global/downloads/products/mavic-3#app>. – Title from screen.

21. Multi-modal sonar mapping of offshore cable lines with an autonomous surface vehicle [Electronic resource] / Jongdae Jung [et al.] // Journal of marine science and engineering. – 2022. – Vol. 10, no. 3. – P. 361. – Mode of access: <https://doi.org/10.3390/jmse10030361>. – Title from screen.

22. Task for creation and criteria for control of uncrewed surface boat for environmental protection missions in shallwater seas [Electronic resource] / V. A. Nadtochiy, A. P. Burunin // Methods and Devices of Quality Control. – 2024. – No. 1(52). – P. 53–65. – Mode of access: [https://doi.org/10.31471/1993-9981-2024-1\(52\)-53-65](https://doi.org/10.31471/1993-9981-2024-1(52)-53-65). – Title from screen.

23. Використання гібридних роботизованих комплексів для інспекції морських нафтогазових об'єктів [Електронний ресурс] / Олександр Іванович Тимочко [та ін.] // Vodnij transport. – 2024. – № 2(40). – С. 6–22. – Режим

доступу: <https://doi.org/10.33298/2226-8553.2024.2.40.01>. – Назва з екрана.

24. Оборона 2025: Ключові тенденції, що рухають інновації | MSS Defence [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://mssdefence.com/ukr/блог/оборона-2025-ключові-тенденції-що-стимул/>. – Назва з екрана.

25. Russo M. A survey on mechanical solutions for hybrid mobile robots [Electronic resource] / Matteo Russo, Marco Ceccarelli // Robotics. – 2020. – Vol. 9, no. 2. – P. 32. – Mode of access: <https://doi.org/10.3390/robotics9020032>. – Title from screen.

26. Американські дослідники створили біологічного робота-трансформера, який може повзати, їхати та літати, та, ймовірно, підкорить Марс. Що він може [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://dev.ua/news/biolohichniy-robot-transformer>. – Назва з екрана.

27. Ghazali M. H. M. Unmanned surface vehicles: from a hull design perspective [Electronic resource] / Mohamad Hazwan Mohd Ghazali, Mohd Hafiz Abdul Satar, Wan Rahiman // Ocean engineering. – 2024. – Vol. 312. – P. 118977. – Mode of access: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.118977>. – Title from screen.

28. Kolawole A. Review of the role of unmanned surface vehicles (usvs) in enhancing offshore oil and gas exploration: opportunities and challenges in nigerian waters” [Electronic resource] / Adeniji Kolawole, Osayi Philip Igbinenikaro // International journal of research and innovation in applied science. – 2024. – Vol. IX, no. X. – P. 171–186. – Mode of access: <https://doi.org/10.51584/ijrias.2024.910017>. – Title from screen.

29. The milestone underscores the reliability of the vehicle, and confirms Saildrone’s position as the only proven long-range, long-endurance uncrewed platform. 2023 [Electronic resource]. – Mode of access: <https://www.saildrone.com/media-room/press-releases/saildrone-fleet-surpasses-1000000-nautical-miles-32-000-days-at-sea>. – Title from screen.

30. Unmanned surface vessels: the catamaran advantage | defense.info

[Electronic resource]. – Mode of access: <https://defense.info/maritime-dynamics/2023/02/unmanned-surface-vessels-the-catamaran-advantage/>. – Title from screen.

31. Selecting a conformal coating for marine electronics [Electronic resource] // Unmanned Systems Technology. – Mode of access: <https://www.unmannedsystemstechnology.com/feature/selecting-a-conformal-coating-for-marine-electronics/>. – Title from screen.

32. Are uncrewed surface vehicles the future of naval combat? [Electronic resource]. – Mode of access: <https://www.naval-technology.com/analyst-comment/uncrewed-surface-vehicles-future-naval-combat/>. – Title from screen.

33. Uncrewed surface vehicles: revolutionizing maritime operations - terminautical [Electronic resource]. – Mode of access: <https://terminautical.com/uncrewed-surface-vehicles-revolutionizing-maritime-operations/>. – Title from screen.

34. VESSELS | Autonaut [Electronic resource]. – Mode of access: <https://www.autonautusv.com/vessels-0>. – Title from screen.

35. Harrop D. P. New autonomous unmanned surface vessels [Electronic resource]. – Mode of access: <https://www.idtechex.com/de/research-article/new-autonomous-unmanned-surface-vessels/9760>. – Title from screen.

36. Autonomous boat gets around under wave power [Electronic resource]. – Mode of access: <https://newatlas.com/autonaut-autonomous-unmanned-surface-vessel/53949/>. – Title from screen.

37. SL20 | OceanAlpha USV [Electronic resource]. – Mode of access: <https://oceanalpha.com/product-item/sl20/>. – Title from screen.

38. Subsea Tech | CAT-Surveyor [Electronic resource]. – Mode of access: <https://www.subsea-tech.com/cat-surveyor/>. – Title from screen.

39. Sonobot-5-system | EvoLogics [Electronic resource] // EvoLogics. – Mode of access: <https://www.evologics.com/sonobot-5-system>. – Title from screen.

40. Надводні безпілотні апарати Sonobot 5 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://insider.rv.ua/nadvodni-bezpilotni-aparaty-sonobot-5>. –

Назва з екрана.

41. Robotic sensors: The interface between robots and the world [Electronic resource]. – Mode of access: <https://howtorobot.com/expert-insight/robotic-sensors-interface-between-robots-and-world>. – Title from screen.

42. Nikishin V. Autonomous unmanned surface vehicle for water surface monitoring [Electronic resource] / Vladimir Nikishin, Maxim Durmanov, Igor Skorik. – 2020. – Vol. 14, no. 4. – P. 853–858. – Mode of access: <https://doi.org/10.12716/1001.14.04.09>. – Title from screen.

43. Keller J. Navy calls-out 49 companies to provide sensors and machine autonomy for unmanned surface vessels (USVs) [Electronic resource]. – Mode of access: <https://www.militaryaerospace.com/uncrewed/article/55089336/unmanned-surface-vessels-usvs-sensors-machine-autonomy>. – Title from screen.

44. Інформаційна система управління автономним надводним роботом [Електронний ресурс] / Коваленко В. О., Соколовський І. П., Бондар І. О. // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2020. – № 3. – С. 84–90. – Режим доступу: <https://ir.lib.vntu.edu.ua/bitstream/handle/123456789/41086/18092.pdf?sequence=3&isAllowed=y>. – Назва з екрана.

45. NOC equips USVs with Airmar weatherstation instruments [Electronic resource] // Unmanned Systems Technology. – 2020. – Mode of access: <https://www.unmannedsystemstechnology.com/2020/07/noc-equips-usvs-with-airmar-weatherstation-instruments/>. – Title from screen.

46. Hybrid approach of unmanned aerial vehicle and unmanned surface vehicle for assessment of chlorophyll-a imagery using spectral indices in stream, south korea [Electronic resource]. – 2021. – Vol. 13, no. 14. – P. 1930. – Mode of access: <https://doi.org/10.3390/w13141930>. – Title from screen.

47. Wi-Fi модуль DevKit V1 з ESP-32 (30 pin) [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://arduino.ua/prod3990-wi-fi-modyl-devkit-v1-s-esp-32>. – Назва з екрана.

48. Модуль камери ESP32-CAM [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://radiostore.com.ua/ua/p1110434996-modul-kamery-esp32.html>. – Назва з екрана.

49. Камера машинного зору OpenMV Cam H7 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://mikronika.net/product/openmv-cam-h7-r2>. – Назва з екрана.

50. Камера Raspberry Pi Camera Module 3 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://arduino.ua/ru/prod5865-kamera-raspberry-pi-camera-module-3-75-12mp-sony-imx708>. – Назва з екрана.

51. Драйвер двох двигунів на L298N [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://arduino.ua/prod406-draiver-dvyh-dvigateli-na-l298n>. – Назва з екрана.

52. Драйвер двигунів двоканальний на TB6612FNG [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://arduino.ua/prod2377-draiver-dvigateli-dvyhkanalni-na-tb6612fng>. – Назва з екрана.

53. Драйвер двигунів двоканальний на DRV8833 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://arduino.ua/prod3697-draiver-dvigateli-dvyhkanalni-drv8833>. – Назва з екрана.

54. Драйвер L293D [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://arduino.ua/prod2608-modyl-draivera-motorov-na-l293d>. – Назва з екрана.

55. Мікромотор (DC-мотор) 12V [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://distancionka.com/ua/catalog/arduino/servoprivody-i-dvigatelya/mikromotor-dc-motor-12v-12000-ob-min/?srsltid=AfmBOoozj-UCVWtL-0n95fKsUNcd6XM26sC3wZhmcUMIBxkQ479hVpwi>. – Назва з екрана.

56. Сервопривод Feetech FS90 180° [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://mikronika.net/ru/product/feetech-servo-fs90>. – Назва з екрана.

57. Серводвигун SG90 2кг 180° [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://arduino.ua/prod416-servoprivod-sg90-2kg>. – Назва з екрана.

58. Сервопривод Power HD 1370A [Електронний ресурс]. – Режим

доступу: <https://arduino.ua/ru/prod4010-servoprivod-mikro-power-hd-1370a>. – Назва з екрана.

59. Датчик відстані ультразвуковий HC-SR04 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.mini-tech.com.ua/ua/datchik-rasstoyaniya-ultrazvukovoy-hc-sr04>. – Назва з екрана.

60. Датчик відстані ультразвуковий US-015 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.mini-tech.com.ua/ua/datchik-rasstoyaniya-ultrazvukovoy-us-015>. – Назва з екрана.

61. Датчик відстані ультразвуковий US-100 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.mini-tech.com.ua/ua/datchik-rasstoyaniya-ultrazvukovoy-us-100>. – Назва з екрана.

62. Акумуляторна батарея Samsung 18650 3200mah [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://e-star.ua/akkumulyatornaya-batareya-samsung-18650-32e-3200mah-10a-blue-siniy-inr18650-32e.html>. – Назва з екрана.

63. BMS 3S 20A [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://rezist.com.ua/bms-kontrolleri-18650/plati-bms-zarjada-razrjada/bms-3s-20a-kontroller-zarjada-razrjada-li-ion-batarej--balansirovka>. – Назва з екрана.

64. DC-DC понижуючий конвертер LM2596. URL: <https://arduino.ua/prod650-dc-dc-poniyuchii-konverter-lm2596-z-4-5-40v-do-3-35v>. – Назва з екрана.

65. Ехолот Deeper Smart Sonar CHIRP+ 2. URL: <https://deeper.fish/uk/product/eholot-deeper-smart-sonar-chirp-2-novynka/>. – Назва з екрана.

66. Антена Wi-Fi 2.4ГГц 3dBi SMA-plug IPX. URL: <https://arduino.ua/prod1751-antena-wi-fi-2-4ggc-3dbi-sma-plug-ipx>. – Назва з екрана.

67. Пара пропелерів KingKong 5045 V2 (CW+CCW). URL: <https://arduino.ua/prod961-para-propellerov-kingkong-5045-v2-cwccw>. – Назва з екрана.

68. Теорія автоматичного управління (збірник задач) [Текст]: навч.

посіб. для студентів спеціальності 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології / І.Ш. Невлюдов, О.В. Токарева; Харків. нац. ун-т радіоелектроніки. - Харків: Панов А.М., 2020. – 240 с.

69. Закон України. Про охорону праці: Закон України від 14.10.1992 № 2694-ХІІ. Відомості Верховної Ради України. 1992. № 49. Ст. 668. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2694-12>

70. Комплекс навчально-методичного забезпечення навчальної дисципліни «Безпека праці в індустрії ІТ-технологій» підготовки освітнього рівня бакалавр усіх спеціальностей та усіх напрямів університету [<http://catalogue.nure.ua/knmz>] / ХНУРЕ; розроб.: Т. Є. Стиценко, Г. В. Пронюк, Н. М. Сердюк. – Харків, 2017. – 122 с.