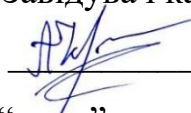


МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова
Навчально-науковий Інститут автоматики та електротехніки

Кафедра комп'ютеризованих систем управління

“Допущений до захисту”
Завідувач кафедри

 Черно О.О.
“ ” _____ 2025р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
на здобуття ступеня вищої освіти «магістр»
(освітньо-кваліфікаційний рівень)

на тему: автономний робот для відбору та аналізу проб води

Виконав: студент **6341мз** групи

 Ватінко О.О.

Керівник роботи:

К.т.н., доцент _____

 Топалов А.М.

Миколаїв – 2025 р.

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова
Навчально науковий інститут (факультет) автоматики і електротехніки

Кафедра комп'ютеризованих систем управління
 Спеціальність 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та
робототехніка»
 Освітня програма «Комп'ютеризовані системи управління та автоматика»

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри КСУ
 **Черно О.О.**
 «__» грудня 2025 р.

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ
на здобуття ступеня вищої освіти «магістр»
 Студенту Ватіпко Олександр Олександровичу
 (прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: автономний робот для відбору та аналізу проб води

Керівник роботи Топалов Андрій Миколайович

затверджені наказом ректора № 1217-уч від «14» жовтня 2025 р.

2. Термін подання роботи: 08.12.2025

3. Вихідні дані по роботі: забезпечення безперервного контролю параметрів
води у режимі реального часу

4. Перелік питань, що належать до розробки (найменування розділів)
Аналіз сучасних методів забору проб води з визначеної глибини водою
Компоненти та структурна організація автономного робота
Математичне моделювання системи обробки та діагностики сигналів датчи-
ків автономного робота
Моделювання програмно-апаратного комплексу системи моніторингу якості
води на базі автономного робота та берегової станції

5. Перелік презентаційних матеріалів
Приклади БПЛА
Структурна схема системи моніторингу якості води
Приклади станцій контролю якості води
Функціональна схема IoT системи автономного робота

Конструкція водного робота

Приклади датчиків автономного робота

Архітектура веб-технологічного стеку

6. Консультанти розділів роботи

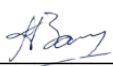
Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
Моделювання програмно-апаратного комплексу системи моніторингу якості води на базі автономного робота та берегової станції	<i>Топалов А.М., доцент каф. КСУ</i>	<i>25.11.2025</i>	<i>01.12.2025</i>

7. Дата видачі завдання: «01» 09 2025 р.

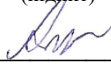
КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Номер	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
1.	Аналіз сучасних методів забору проб води з визначеної глибини водойм	15.10.2025	<i>Виконано</i>
2.	Компоненти та структурна організація автономного робота	31.10.2025	<i>Виконано</i>
3.	Математичне моделювання системи обробки та діагностики сигналів датчиків автономного робота	18.11.2025	<i>Виконано</i>
4.	Моделювання програмно-апаратного комплексу системи моніторингу якості води на базі автономного робота та берегової станції	01.12.2025	<i>Виконано</i>
5.	Оформлення пояснювальної записки	04.12.2025	<i>Виконано</i>

Студент


(підпис)

Керівник роботи


(підпис)

Ватіпко О.О.

(прізвище та ініціали)

Топалов А.М.

(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Обсяг кваліфікаційної роботи 92 сторінки, у якій: 44 рисунки, 1 таблиця та 15 використаних джерел.

Метою даної кваліфікаційної роботи є розробка автономного робота для відбору та аналізу проб води.

У кваліфікаційній роботі було проведено аналіз сучасних методів забору проб води та обмежень традиційних методів, розглянуто автоматизовані системи контролю якості води, а також використання технологій Інтернету речей для моніторингу стану водойм. Розроблено структуру та компоненти автономного робота, описано алгоритми його керування та навігації, а також засоби передачі даних. Проведено математичне моделювання системи обробки та діагностики сигналів датчиків робота з використанням вейвлет-перетворення та методів шумозаглушення для сигналів різкої зміни. На основі проведеного аналізу та моделювання створено програмно-апаратний комплекс для моніторингу якості води, який включає веб-інтерфейс для відображення даних та інтеграцію з базою даних. Реалізовано обмін даними між автономним роботом та береговою станцією, що забезпечує оперативний контроль за станом водних ресурсів.

Ключові слова: автономний робот, моніторинг якості води, забор проб води, Інтернет речей, алгоритм навігації, математичне моделювання, обробка сигналів, веб-інтерфейс, база даних.

ABSTRACT

The volume of the qualification work is 92 pages, which includes 44 figures, 1 table, and 15 references.

The purpose of this qualification work is the development of an autonomous robot for water sampling and analysis.

The work presents an analysis of modern water sampling methods and the limitations of traditional methods, considers automated water quality control systems, as well as the use of Internet of Things technologies for monitoring the condition of water bodies. The structure and components of the autonomous robot are developed, its control and navigation algorithms are described, as well as the means of data transmission. Mathematical modeling of the robot's sensor signal processing and diagnostics system was carried out using wavelet transform and noise suppression methods for signals with abrupt changes. Based on the conducted analysis and modeling, a hardware-software complex for water quality monitoring was created, which includes a web interface for data visualization and integration with a database. Data exchange between the autonomous robot and the shore station was implemented, providing operational control over the condition of water resources.

Keywords: autonomous robot, water quality monitoring, water sampling, Internet of Things, navigation algorithm, mathematical modeling, signal processing, web interface, database.

ЗМІСТ

ВСТУП	7
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНИХ МЕТОДІВ ЗАБОРУ ПРОБ ВОДИ З ВИЗНАЧЕНОЇ ГЛИБИНИ ВОДОЙМ	8
1.1 Недоліки та обмеження традиційних методів забору проб води	8
1.2 Сучасні методи моніторингу якості води та забору проб з визначеної глибини	10
1.3 Використання Інтернету речей для моніторингу якості води	14
1.4 Автоматизовані системи контролю якості води	18
РОЗДІЛ 2. КОМПОНЕНТИ ТА СТРУКТУРНА ОРГАНІЗАЦІЯ АВТОНОМНОГО РОБОТА	26
2.1 Засоби та технології для передачі даних	26
2.2 Розробка функціональної схеми автономного роботу	28
2.3 Алгоритм керування та навігації автономного робота	34
2.4 Опис компонентів автономного робота	39
РОЗДІЛ 3. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ ОБРОБКИ ТА ДІАГНОСТИКИ СИГНАЛІВ ДАТЧИКІВ АВТОНОМНОГО РОБОТА	60
3.1 Самотестування та діагностика на основі вейвлет-перетворення	60
3.2 Шумозаглушення для сигналу різкої зміни	64
РОЗДІЛ 4. МОДЕЛЮВАННЯ ПРОГРАМНО-АПАРАТНОГО КОМПЛЕКСУ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ ЯКОСТІ ВОДИ НА БАЗІ АВТОНОМНОГО РОБОТА ТА БЕРЕГОВОЇ СТАНЦІЇ	70
4.1 Вибір та обґрунтування програмних засобів для розробки системи моніторингу	70
4.2 Розробка веб-інтерфейсу системи моніторингу якості води	82
4.3 Реалізація обміну даними та інтеграція з базою даних	85
ВИСНОВКИ	90
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	91

ВСТУП

Актуальність. Моніторинг якості води є критично важливим завданням для забезпечення екологічної безпеки та охорони здоров'я населення. За даними ООН, близько 80% стічних вод у світі скидаються у водойми без належного очищення, що призводить до понад 3,4 мільйона смертей щороку. Традиційні методи забору проб води мають суттєві недоліки: значні похибки у визначенні глибини через вплив припливів, хвиль та атмосферного тиску; залежність від великогабаритних кораблів; високу вартість та обмежені можливості роботи у важкодоступних районах.

Технології автоматизації та Інтернету речей (IoT) створюють передумови для докорінної зміни підходів до екологічного моніторингу. Автономні роботи з багатосенсорними системами та бездротовими каналами зв'язку дозволяють забезпечити безперервний контроль параметрів води у режимі реального часу.

Об'єкт дослідження – автономний робот для відбору, аналізу проб води та його система моніторингу.

Предмет дослідження – методи та алгоритми автономного відбору проб води, обробки сигналів датчиків на основі вейвлет-перетворення, передачі даних через бездротові канали зв'язку та візуалізації результатів моніторингу.

Метою роботи – є розробка автономного робота для відбору та аналізу проб води з визначеної глибини водойм, що включає систему навігації, багатосенсорний модуль контролю параметрів води, модуль самодіагностики на базі DSP, бездротовий канал передачі даних та веб-орієнтовану систему моніторингу на базі берегової станції.

Основні задачі дослідження – аналіз сучасних методів забору проб води та їх недоліків. Розробка функціональної та структурної схем автономного робота. Створення алгоритмів керування, навігації та самодіагностики. Розробка математичної моделі обробки сигналів на основі вейвлет-перетворення. Проектування веб-інтерфейсу системи моніторингу.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНИХ МЕТОДІВ ЗАБОРУ ПРОБ ВОДИ З ВИЗНАЧЕНОЇ ГЛИБИНИ ВОДОЙМ

1.1 Недоліки та обмеження традиційних методів забору проб води

Сучасні методи забору проб води з певної глибини водойм, що здійснюються з корабля, мають низку істотних недоліків та обмежень. Основною проблемою є похибки у визначенні реальної глибини, з якої береться проба води. У традиційному підході оператор вручну або за допомогою підйомного крана опускає ємність у воду, відкриває її на визначеній глибині і закриває після заповнення водою. Проте точкою відліку при цьому є палуба корабля, що створює значні помилки у вимірюваннях через вплив таких факторів:

- Припливи та відпливи, що змінюють рівень води відносно корабля;
- Розгойдування корабля, викликане хвилями;
- Похибки у визначенні довжини троса, що використовується для опускання ємності.

Ці фактори можуть призводити до похибки у визначенні глибини на кілька метрів. Особливо критично це у випадках, коли необхідно взяти пробу води на малій відстані від поверхні водойми.

Іншим суттєвим недоліком є залежність процесу забору проб від переміщення великогабаритного корабля між точками відбору. Для цього необхідна зупинка корабля у визначених місцях, що супроводжується значними витратами палива та підвищує вартість кожної проби води.

Автономні підводні апарати, які використовують датчики тиску води для визначення глибини, також мають свої обмеження. Точність таких датчиків знижується через вплив:

- Припливів та відпливів, що змінюють рівень води;
- Хвиль на поверхні води;
- Змін атмосферного тиску, що спотворює показники датчика.

Додатково, у момент забору проби води змінюється вага апарата, що порушує баланс між вагою апарата та архімедовою силою. Це спричиняє його занурення. Для відновлення рівноваги система управління змінює вагу чи об'єм апарата, але через затримку апарат не залишається на одній і тій же глибині, що створює додаткову похибку у позиціонуванні.

Таким чином, традиційні методи забору проб води демонструють недостатню адаптивність до зовнішніх умов, що суттєво обмежує їх застосування у сучасних дослідженнях [1]. Крім того, через складність забезпечення високої точності такі методи не завжди відповідають вимогам наукових і прикладних досліджень, особливо в умовах потреби у високій деталізації даних.

Важливо також зазначити, що використання великих кораблів і тросових систем призводить до зростання логістичних витрат. Такі підходи є енергозатратними, що підвищує вуглецевий слід від виконання подібних операцій. Це особливо актуально в умовах сучасних екологічних викликів та необхідності мінімізації впливу дослідницької діяльності на довкілля.

Ще одним обмеженням є складність реалізації забору проб у важкодоступних або небезпечних районах, таких як мілководдя, зони з високим хвилюванням, льодові покриття чи місця із сильними течіями. У таких умовах використання традиційних кораблів та тросових систем стає технічно складним або навіть неможливим.

Недоліки автономних підводних апаратів також підкреслюють їхню обмежену ефективність. Наприклад, необхідність корекції ваги чи об'єму апарата під час роботи потребує складних систем управління, які не завжди можуть забезпечити потрібну оперативність. Це створює затримки, які знижують загальну ефективність апарата, особливо у завданнях, що вимагають миттєвої реакції або точного позиціонування.

Отже, очевидною є потреба у розробці нових підходів до забору проб води, які могли б забезпечити високу точність, енергоефективність, автономність та екологічну безпечність [2]. Це особливо актуально для

сучасних наукових і прикладних досліджень, які потребують інноваційних рішень для дослідження водойм у різноманітних умовах.

1.2 Сучасні методи моніторингу якості води та забору проб з визначеної глибини

Моніторинг якості води є важливим завданням для оцінки впливу забруднень із сільськогосподарських угідь, зливових і побутових стоків на водні ресурси. За даними ООН, близько 80% стічних вод у світі скидаються в річки, озера та океани без належного очищення. Ці забруднення є причиною водних захворювань, таких як поліомієліт, малярія, холера та діарея, що призводять до смерті понад 3,4 мільйона людей щороку. Всесвітня організація охорони здоров'я (ВООЗ) видає рекомендації щодо якості води, спрямовані на забезпечення безпеки питної води для захисту здоров'я населення.

Традиційні методи моніторингу якості води, такі як ручний відбір проб із берега чи за допомогою човнів, мають суттєві недоліки. Вони можуть бути небезпечними, особливо у важкодоступних районах або водоймах із ціанобактеріальними цвітіннями, які становлять загрозу здоров'ю людини. Крім того, такі методи є трудомісткими, дорогими, а також обмеженими в просторовому охопленні.

Сучасні станції моніторингу якості води та бездротові сенсорні мережі дозволяють проводити безперервні вимірювання параметрів якості води, таких як рівень кисню, температура, солоність, каламутність, глибина тощо. Проте ці методи вимагають регулярного обслуговування сенсорів, які з часом можуть видавати недостовірні дані. Також стаціонарне розташування таких станцій обмежує їхню здатність до збору даних із високою просторовою роздільною здатністю.

Інноваційні рішення для моніторингу якості води передбачають використання дистанційного зондування та безпілотних літальних апаратів (БПЛА) [3]. БПЛА (рис. 1.1) використовуються для проведення

топографічного та батиметричного моніторингу, а також для спостереження за цвітінням водоростей у поверхневих водах. Деякі системи БПЛА оснащуються сенсорами, які дозволяють проводити вимірювання параметрів якості води на місці, а також здійснювати відбір проб із визначених глибин для більш точного аналізу.



Рис. 1.1 – БПЛА для забору проб води

Одним із перспективних напрямів є розробка адаптивних систем відбору проб води, які інтегруються з БПЛА. Такі системи дозволяють проводити відбір проб лише у разі перевищення допустимих значень параметрів якості води. Це значно скорочує витрати на аналіз проб і підвищує ефективність моніторингу. Прикладом є використання БПЛА для відбору проб із важкодоступних місць, таких як шахтні озера чи ізольовані водойми. Проте обмеженням таких систем є мала вантажопідйомність і обмежена тривалість польотів БПЛА.

Для підвищення достовірності даних дистанційного моніторингу важливим є радіометричне калібрування мультиспектральних сенсорів, яке забезпечує коректність вимірювань в різних умовах освітлення [4].

Моніторинг якості води є необхідним для ефективного управління водними ресурсами. Періодичний відбір проб та їх аналіз дозволяє охарактеризувати воду і виявити зміни або тенденції у якості води з часом. Наприклад, забруднювачі, які надходять зі стічними водами, можуть включати бактерії, поживні речовини, сміття, осад, олії та важкі метали. Завдяки моніторингу можна зібрати дані для впровадження програм із запобігання та усунення забруднення.

Водні об'єкти отримують забруднення від точкових і дифузних джерел. Точкові джерела включають дренажні канали, промислові стоки та очисні споруди. Забруднення з дифузних джерел, таких як дорожні покриття або дахи, з'являється після дощів або аварійних переливів. Нагрітий стік з доріг може підвищувати температуру водойм, що призводить до змін біологічної активності. Подібні джерела можна контролювати за допомогою систем відбору проб із тригером подій.

Крім контролю після дощових подій, регулярний відбір проб є важливим для виявлення джерел забруднення. Наприклад, вимивання поживних речовин із сільськогосподарських угідь може спричинити цвітіння водоростей. Такі цвітіння, особливо синьо-зелених водоростей, можуть бути токсичними для людей і тварин.

Сучасний моніторинг якості води часто здійснюється волонтерами на човнах, які вимірюють такі параметри, як каламутність, температура, рН, розчинений кисень, електрична провідність, азот і фосфор. Температура і рН є ключовими показниками, які впливають на біологічну активність. Високі концентрації хлоридів, що походять від добрив і солі, можуть спричиняти токсичність для рослин і тварин.

Однак доступ до водойм із крутими берегами чи токсичними водоростями ускладнений. Альтернативою є автономні підводні та надводні транспортні засоби. Проте їх використання обмежується складністю навігації у водному середовищі.

Було проаналізовано автономну систему відбору проб води з застосуванням БПЛА (рис. 1.2). У системі застосовано мультикоптер, обладнаний механізмом захоплення води, сервоприводом і плавучими елементами. Основні компоненти БПЛА наведені в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1. Технічні характеристики компонентів БПЛА

Назва частини	Модель/Номер	Технічні характеристики	Функція	Кількість	Вага (г)
Двигуни	T-Motor/MN3110	KV700	Головний привід	6	480
Електронні регулятори швидкості	Arris SimonK	30 А	Контроль швидкості	6	150
Гвинти	Andoer/1045	Вуглецеве волокно	Рушний	6	51
Мікроконтролер	Pixhawk	Відкрите апаратне забезпечення	Контроль польотів	1	182
Акумулятор	Venom 14.8V	25C 4S 5000 мАг	Джерело живлення	1	542
Модуль живлення	3DR-XT60	BEC 3 A 5.3 V 7S	Розподіл потужності	1	28
RC приймач	9X 8Ch Mode2	2,4 ГГц	Прийняти команду	1	8.5
Радіоприймач	3DR	433 МГц	Радіокоманда	1	8.5
GPS	3DR-0003	Compass 5 Гц	GPS антена	1	45
Сервопривод	SG90	4.8 В (1 кг/см)	Тригери семплера	1	9
Рамка	F550	Електропроводка на друкованій платі	Містить запчастини	1	678
Плаваючі частини	N/A	753 см ³	Забезпечує плавання	12	151
Разом					2333

Система контролюється вручну за допомогою радіоконтролера та автономно за допомогою польотного контролера Pixhawk. Зв'язок із наземною станцією забезпечується телеметричним передавачем. Для захисту електронних компонентів використовується антикорозійне покриття.



а

б

Рис. 1.2 – БПЛА з плавучим обладнанням:

а) корпус; б) водозабірний механізм

Ефективність БПЛА у зборі проб води підтверджує перспективність технології для моніторингу якості води у важкодоступних або потенційно небезпечних зонах.

1.3 Використання Інтернету речей для моніторингу якості води

Моніторинг якості води є однією з важливих складових екологічної безпеки та збереження природних ресурсів. В умовах зростаючого попиту на водні ресурси та постійного забруднення водойм, забезпечення безпечної води для споживання стає важливим завданням для багатьох держав і підприємств. Одним із найбільш ефективних інструментів для моніторингу води є система Інтернету речей (IoT) [5]. Застосування технологій IoT дозволяє здійснювати

постійний контроль за станом води в режимі реального часу, що дає змогу вчасно виявляти та усувати проблеми, пов'язані з її якістю.

Методи машинного навчання, інтегровані у такі системи, дозволяють підвищити точність прогнозування змін у якості води та виявляти аномальні процеси на ранніх етапах [6].

Основні принципи роботи системи моніторингу якості води на основі IoT. Система моніторингу якості води на основі IoT працює завдяки інтеграції різноманітних технологій, включаючи сенсори, пристрої збору та обробки даних, комунікаційні шлюзи та хмарні сервіси [7]. Усі ці компоненти взаємодіють для забезпечення безперервного збору та аналізу даних про стан води, що дозволяє оперативно реагувати на зміни її якості. Пояснимо детальніше принцип роботи кожного з компонентів такої системи.

- Датчики (сенсори). Датчики є основними елементами, що збирають дані з навколишнього середовища. Вони можуть вимірювати різні параметри води, такі як рівень рН, температура, концентрація розчинених кисню та хімічних забруднювачів, таких як нітрати, амоній, важкі метали тощо. Сенсори, що працюють в рамках системи IoT, можуть бути бездротовими і вбудовуватися безпосередньо в природні водні ресурси, що дозволяє проводити вимірювання в реальному часі без необхідності частої фізичної перевірки;
- Шлюзи IoT. Шлюзи виконують важливу роль у системі, вони служать як міст між датчиками і іншими компонентами системи. Завдяки шлюзам, дані з сенсорів можуть передаватися до хмарних або периферійних обчислювальних пристроїв для подальшої обробки. Шлюзи також можуть здійснювати попередню обробку даних без необхідності їх негайної передачі в хмару, що дозволяє зменшити затримки та навантаження на центральні сервери. Для передачі даних через шлюз можуть використовуватись різні технології, такі як Wi-Fi, Bluetooth, Zigbee, або більш енергозберігаючі рішення типу LPWAN (Low Power Wide Area Network);

- Периферійні обчислювальні пристрої. Для зниження навантаження на сервери хмарної обробки та зменшення затримок, обчислювальні пристрої можуть розташовуватись на рівні шлюзів або ближче до джерела даних. Вони здійснюють попередню обробку інформації, аналізують її на місці та передають лише важливі результати або зведені дані в хмару. Це дозволяє оперативно реагувати на відхилення параметрів якості води, що може бути критичним у разі забруднення води або зміни її складу;
- Хмарні сервіси для зберігання та обробки даних. Після того як дані зібрані та передані через шлюзи, вони можуть бути направлені в хмару для зберігання та подальшої обробки. У хмарі дані можуть бути оброблені спеціалізованими алгоритмами для виявлення аномалій, тенденцій або прогнозування зміни параметрів води. Наприклад, якщо рівень рН води різко знижується, система може попередити операторів про потенційне забруднення. Алгоритми машинного навчання та аналітики допомагають виявити закономірності та робити прогнози щодо майбутніх змін у водних ресурсах;
- Інтерфейс для користувачів та сповіщення. Для забезпечення зручного доступу до даних користувачам пропонуються різні інтерфейси, такі як мобільні додатки або веб-портали. Вони дозволяють в реальному часі отримувати інформацію про стан води в різних точках, а також отримувати сповіщення про можливі проблеми. Наприклад, користувач може бути сповіщений про підвищений рівень токсичних речовин або нестабільний рівень розчиненого кисню, що може загрожувати водним екосистемам. Це дає можливість оперативно вжити заходів для покращення якості води.

Структурна (рис. 1.3) та функціональна (рис. 1.4) схеми можуть наочно продемонструвати, як ці компоненти взаємодіють між собою. Сенсори, які вимірюють параметри води, передають дані через шлюзи в хмару або на периферійні пристрої. Після обробки ці дані можуть бути надані користувачам

через мобільні додатки або веб-сервіси. У разі виявлення аномалій або відхилень від стандартів якості води система може негайно сповістити відповідні органи або кінцевих користувачів.

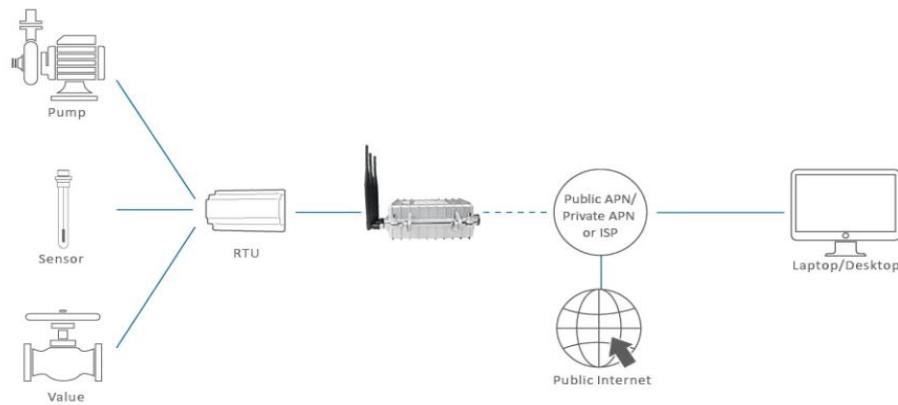
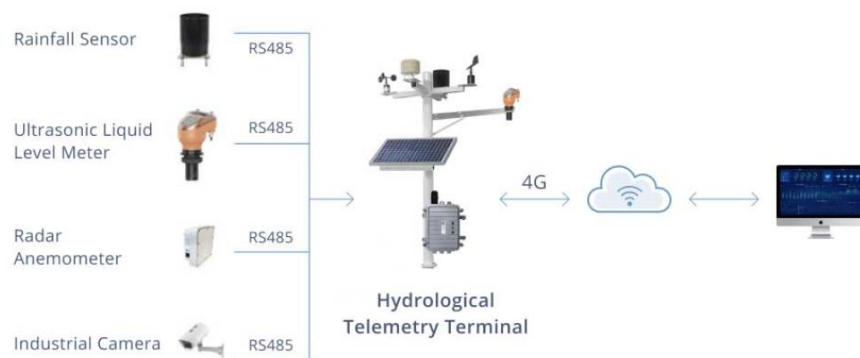


Рис. 1.3 – Структурна схема системи моніторингу якості води на основі Інтернету речей



а



б

Рис. 1.4 – Функціональна схема системи моніторингу якості води на основі Інтернету речей:

а) схема топології мережі; б) опис пристрою

Основними перевагами використання IoT у моніторингу якості води є:

- Безперервний моніторинг. Технологія IoT дозволяє здійснювати моніторинг води в режимі реального часу, що забезпечує миттєву реакцію на будь-які зміни параметрів води;
- Автоматизація. Система автоматично збирає і обробляє дані, що значно знижує необхідність у ручному втручанні та зменшує ймовірність помилок;
- Зменшення витрат. IoT рішення дозволяють знизити витрати на традиційні методи моніторингу, які часто вимагають значних затрат на інфраструктуру та операційні витрати;
- Прогнозування. Завдяки аналітичним інструментам, IoT дозволяє прогнозувати потенційні проблеми з якістю води, що допомагає запобігати катастрофічним наслідкам.

IoT-моніторинг якості води знаходить застосування в багатьох сферах:

- Моніторинг водойм. Для контролю якості води в річках, озерах та інших водоемностях, що дозволяє виявляти забруднення та контролювати стан екосистем;
- Водопостачання. Для моніторингу споживання води в побуті та на підприємствах, що допомагає своєчасно виявляти витoki та знижувати споживання води;
- Охорона здоров'я. У випадку виявлення шкідливих речовин у воді, система може сповіщати органи охорони здоров'я про потенційну небезпеку для населення.

Також навчальні матеріали з IoT описують принципи створення енергоефективних сенсорних систем, які можуть тривалий час працювати автономно в умовах природного середовища [8].

1.4 Автоматизовані системи контролю якості води

Автоматизовані системи контролю якості води (АСКВ) стали необхідним інструментом для забезпечення безпеки водних ресурсів і гарантування здоров'я населення, оскільки вони дозволяють швидко і точно здійснювати моніторинг забруднення води. Вони активно застосовуються в різних сферах, від промислових підприємств до водопостачальних та водоочисних систем, де контроль за якістю води є критично важливим. Автоматизація процесу вимірювання показників води допомагає значно зменшити витрати на обслуговування та підвищити точність результатів, забезпечуючи оперативне реагування на зміни в якості води.

Контроль якості води на водних об'єктах проводиться через регулярне відбирання проб з поверхневих джерел та їх подальший аналіз. Згідно з державними стандартами, проби води повинні бути відібрані не рідше одного разу на місяць, а також повинні визначатися кількість і місце їх відбору, що залежить від гідрологічних та санітарних характеристик водойм [9]. Обов'язковим є також відбір проб безпосередньо в місцях водозабору, а також на відстані 1 км вище за течією для річок або водоканалів, а для озер і водосховищ – на відстані 1 км від водозабору у двох діаметрально розміщених точках.

Це необхідно для точного визначення концентрації забруднюючих речовин, а також для контролю за динамікою змін якості води, що має велике значення для забезпечення нормального функціонування систем водопостачання. Водночас традиційні методи контролю якості води, які полягають в періодичному відборі проб води і лабораторному аналізі, мають кілька недоліків. Серед них можна виділити залежність від часу, необхідного для доставки проб до лабораторії, а також ризик помилок при обробці результатів. Застосування автоматизованих систем дозволяє усунути ці проблеми, оскільки вони забезпечують оперативний моніторинг безпосередньо на місці і в реальному часі.

Сучасні автоматизовані системи контролю якості води можуть одночасно вимірювати до 10 основних показників, що визначають якість води,

включаючи розчинений кисень, електропровідність, рН, температуру, концентрацію завислих часток, біохімічне споживання кисню, концентрацію важких металів (наприклад, міді) та інші. Ці параметри є важливими індикаторами стану води і дозволяють оцінити рівень забруднення та вплив різноманітних забруднюючих агентів.

Однією з основних переваг автоматизованих систем є швидкість отримання даних. Вимірювання параметрів води за допомогою спеціальних датчиків дозволяє оперативно отримувати інформацію, яка в реальному часі надходить до центру обробки інформації. Це дає можливість вчасно виявити забруднення і прийняти необхідні заходи для їх усунення або зниження впливу на навколишнє середовище та здоров'я людей.

Існуючі автоматизовані системи контролю якості води можна класифікувати на два основних типи в залежності від їх функціональних можливостей та призначення:

- Переносні прилади, що використовуються для вимірювань в польових умовах та в рухомих лабораторіях. Ці прилади дозволяють вимірювати органолептичні показники води, рН середовища, вміст крупнодисперсних (завислих) речовин, хімічне використання кисню (ХВК), біохімічне використання кисню (БВК) та інші параметри;
- Стаціонарні прилади, що використовуються в системах автоматизованого спостереження та контролю забруднення. Вони забезпечують постійний моніторинг якості води і можуть бути встановлені в місцях водозабору або на водоочисних станціях.

Системи автоматизованого контролю якості води складаються з кількох основних елементів. Одним із ключових компонентів є вимірна станція (рис. 1.5, 1.6), яка складається з помпово-гідравлічної частини, вимірювальної частини, приладів вимірювання і перетворення та апаратури зв'язку. Помпово-гідравлічна частина забезпечує забір води і подачу її до датчиків без змін в її складі та температурі. Вимірювальна частина перетворює фізико-хімічні параметри води в електричні сигнали, що передаються на подальшу обробку.

Прилади вимірювання та перетворення забезпечують аналогово-цифрове перетворення сигналів, їх масштабування і видачу коду на регістратор для подальшої обробки. Апаратури зв'язку дозволяє передавати отримані дані в центр обробки інформації, де вони аналізуються і приймаються відповідні рішення. Такі системи можуть забезпечити моніторинг якості води на протязі тривалого часу, що має важливе значення для оперативного реагування на зміни.



Рис. 1.5 – Приклад станції контролю якості води:
а) зовнішній вигляд; б) розібраний вигляд



Рис. 1.6 – Приклад станції контролю якості води

На рис. 1.7 зображена електронна схема станції. Вона складається з наступних основних елементів:

1. Електронний блок управління. Забезпечує контроль та керування всіма підключеними компонентами. У цьому блоці знаходяться реле для керування насосами, освітленням та іншими пристроями (AUX 1, AUX 2, AUX 3). Він також має інтерфейси для підключення зовнішнього обладнання, таких як Wi-Fi модуль або віддалений дисплей.
2. Температурний датчик. Підключений до блоку управління через три контакти (чорний, жовтий, червоний дроти). Він відповідає за вимірювання температури води.
3. Датчики якості води. pH-зонд – вимірює кислотність води, Redox-зонд – визначає окисно-відновний потенціал та інші датчики, які можуть контролювати різні фізико-хімічні параметри.
4. Помпово-гідравлічна частина. Насос для циркуляції води (Filter Pump) та додаткове обладнання для подачі реагентів (AUX 1–AUX 4).
5. Апарат зв'язку та опційний модуль. Дозволяє передавати дані до центральної системи моніторингу або взаємодіяти з іншими пристроями через Wi-Fi чи віддалений екран.
6. Електроживлення. Схема працює від напруги 110–230 В, і захищена від перевантажень завдяки вимогам до підключення через захисний пристрій (RCD).

Усе це дозволяє автоматизувати процес моніторингу та керування параметрами води, забезпечуючи їх передачу для подальшої обробки, аналізу та реагування на зміни в реальному часі.

Завдяки інтеграції датчиків і виконавчих механізмів система може підтримувати оптимальні параметри води, такі як рівень pH, окисно-відновний потенціал і температура, що є критично важливим для забезпечення безпечної та ефективної роботи водних систем. Крім того, можливість віддаленого керування і передачі даних через Wi-Fi або інші засоби зв'язку дозволяє

інтегрувати станцію в загальну систему автоматизації, що значно спрощує експлуатацію та обслуговування.

Система також забезпечує гнучкість у налаштуванні та розширенні функціоналу завдяки додатковим входам/виходам для підключення додаткових модулів, таких як освітлення, додаткові насоси чи системи хімічного дозування. Це робить її універсальним рішенням для різних застосувань – від побутових басейнів до промислових установок.

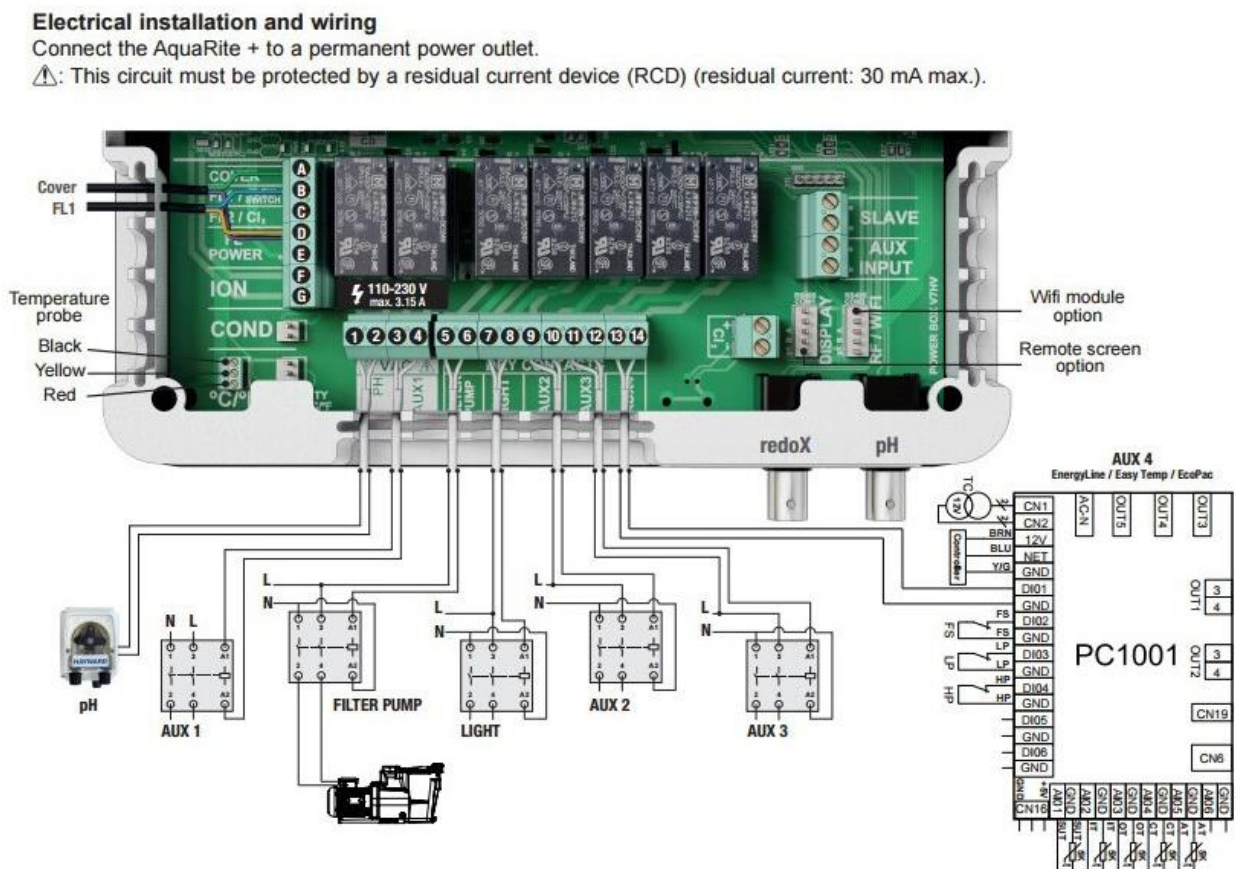


Рис. 1.7 – Електронна схема станції контролю якості води

Використання автоматизованих систем контролю якості води дає змогу отримувати точні і актуальні дані щодо стану водних ресурсів, що дозволяє ефективно реагувати на можливі загрози забруднення та запобігати негативним наслідкам для екології і здоров'я людей. Завдяки таким системам можна значно покращити якість води в водозаборах і на водоочисних станціях, а також забезпечити дотримання екологічних стандартів і нормативів.

До основних переваг автоматизованих систем можна віднести:

- високу точність і швидкість вимірювань;
- можливість безперервного моніторингу;
- зниження витрат на обслуговування;
- оперативність у прийнятті рішень.

Сучасні рішення в цій сфері базуються на архітектурних принципах IoT, застосовують оптимізовані протоколи взаємодії та підтримують інтелектуальні функції аналізу зібраних даних [10].

Системи автоматизованого контролю якості води також сприяють збереженню водних ресурсів, зменшують ризик забруднення водоносних горизонтів і забезпечують стійкість екосистем. Впровадження таких технологій є важливим кроком у забезпеченні сталого розвитку водного господарства та екологічної безпеки національних водних ресурсів.

Технології автономних роботів, що автоматизують процес відбору та аналізу проб води, дозволяють значно полегшити процес збору даних і зменшити людський фактор. Вони можуть бути використані в різних ситуаціях, таких як контроль якості води в промислових зонах, на водозаборах, в річках та озерах, що дозволяє здійснювати моніторинг забруднення без необхідності постійної присутності людського персоналу.

Таким чином, автоматизовані системи контролю якості води є надзвичайно важливими для забезпечення сталого управління водними ресурсами, захисту екології і охорони здоров'я населення. Вони допомагають покращити ефективність і точність контролю, забезпечуючи вчасне виявлення та ліквідацію забруднень, що є важливим для забезпечення безпеки питної води та екологічної стабільності водних екосистем.

Висновки за розділом 1

У результаті аналізу сучасних методів забору проб води з визначеної глибини водойм вирішено наступні питання:

1. Проаналізовано недоліки традиційних методів забору проб води, зокрема похибки у визначенні глибини через вплив хвиль, припливів та атмосферного тиску, залежність від великих кораблів та обмеження у важкодоступних районах.
2. Розглянуто сучасні методи моніторингу якості води, включаючи використання автономних підводних апаратів та безпілотних літальних апаратів (БПЛА), які підвищують точність і знижують вартість процесу.
3. Вивчено можливості застосування Інтернету речей (IoT) у моніторингу якості води, що дозволяє здійснювати безперервний збір даних у реальному часі з використанням сенсорів, шлюзів та хмарних сервісів.
4. Досліджено переваги автоматизованих систем контролю якості води, які забезпечують швидкість, точність і зручність моніторингу основних параметрів води без участі людини.

Аналіз підтвердив актуальність розробки та впровадження інноваційних систем для забору проб води, що забезпечують високу точність, автономність, екологічну безпеку та адаптивність до умов експлуатації.

РОЗДІЛ 2. КОМПОНЕНТИ ТА СТРУКТУРНА ОРГАНІЗАЦІЯ АВТОНОМНОГО РОБОТА

2.1 Засоби та технології для передачі даних

Розвиток сучасних інформаційних систем та Інтернету речей значною мірою визначається можливістю надійної передачі даних між великою кількістю пристроїв. Оскільки кожен елемент мережі має бути однозначно ідентифікований, застосовуються IP-технології. Обмежений адресний простір IPv4 поступово стимулює перехід до IPv6, який забезпечує практично необмежену кількість унікальних адрес та створює основу для підключення мільйонів сенсорів, виконавчих механізмів і вузлів автоматизованих систем. Саме підтримка IPv6 є ключовою умовою подальшого розвитку мережевих інфраструктур у розподілених та автономних системах.

Для організації бездротових мереж, де критичними є енергоефективність, відмовостійкість і можливість самоорганізації, широко застосовується стандарт IEEE 802.15.4. Він лежить в основі таких технологій, як ZigBee та 6LoWPAN, які забезпечують передачу невеликих обсягів інформації за мінімального споживання енергії.

ZigBee — малопотужна мережева технологія, що дає змогу створювати приватні бездротові мережі для сенсорів і керуючих пристроїв. Вона вирізняється низькою швидкістю передачі даних, невисокою вартістю компонентів та здатністю працювати в умовах обмежених енергоресурсів.

На рис. 2.1 наведено типовий вигляд модуля ZigBee, що використовується в подібних системах.

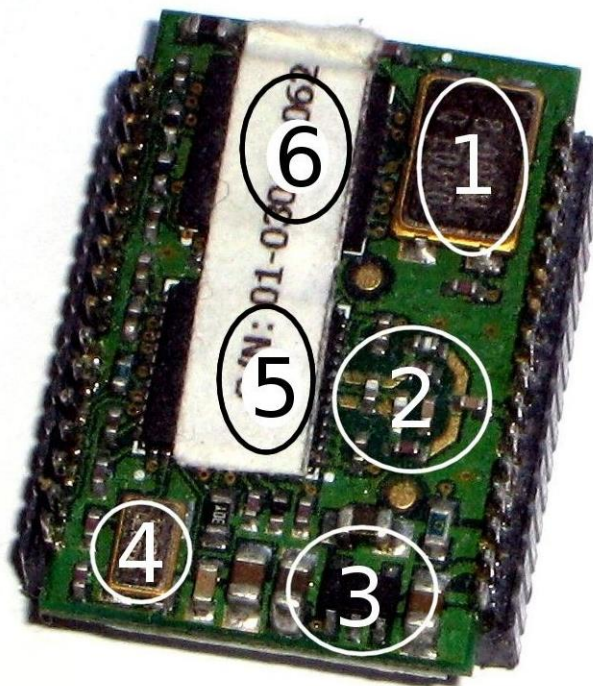


Рис. 2.1 – Модуль ZigBee

Технологія Wi-Fi, яка працює в діапазонах 2,4 та 5 ГГц, забезпечує високі швидкості передавання даних, що робить її придатною для мультимедійних потоків або великих пакунків інформації. Водночас її енергоспоживання значно вище, ніж у мереж на базі IEEE 802.15.4, що обмежує застосування у пристроях, які працюють автономно або мають низьковольтне живлення.

Bluetooth орієнтований на короткодіапазонний обмін даними у персональних мережах. Оновлені модифікації, зокрема Bluetooth Low Energy, поєднують мале енергоспоживання з достатнім радіусом дії, що робить технологію поширеною у сенсорних системах, побутовій техніці та носимих пристроях.

Окрему роль у побудові мереж відіграють PLC-технології, які забезпечують передавання даних через існуючі електромережі. Це особливо корисно для стаціонарних систем, де підключення до мережі електропостачання вже є, наприклад у розумних лічильниках або системах керування освітленням. Протокол 6LoWPAN, що поєднує можливості IPv6 з IEEE 802.15.4 і може працювати також через PLC, є одним із перспективних інструментів реалізації малопотужних IP-мереж.

Організація передачі даних у сучасних системах потребує використання кількох взаємодоповнювальних технологій:

- ідентифікаційні засоби – RFID-мітки, QR-коди;
- сенсорні модулі, що реєструють зміни параметрів середовища;
- вбудовані обчислювальні платформи для аналізу та буферизації даних;
- мережеві технології Wi-Fi, Bluetooth, ZigBee, 6LoWPAN;
- легкі протоколи прикладного рівня (наприклад, MQTT), які оптимізують передачу телеметрії та вимірювальних даних.

2.2 Розробка функціональної схеми автономного роботу

Сучасні автономні підводні роботи для моніторингу якості води поєднують засоби відбору проб, самодіагностики та обробки даних. Водночас більшість існуючих рішень мають низку обмежень, що ускладнюють їх використання у реальних умовах. Зокрема, робота тривалий час перебуває під водою, тому традиційні навігаційні засоби, такі як GPS, не забезпечують точного позиціонування. Крім того, більшість роботів проєктуються для відносно сприятливих умов експлуатації, що знижує точність контролю параметрів води у складних або забруднених акваторіях. У разі пошкодження апаратури дистанційне керування також може бути втрачено, що створює ризики для місії.

Окремою проблемою залишається робота мережевої інфраструктури: нестабільність каналу зв'язку та значна ймовірність відмов не відповідають вимогам до високої надійності та продуктивності. Крім того, у більшості систем канал зв'язку між підводним модулем і береговою станцією використовується переважно для передавання даних, тоді як можливості аналізу та ухвалення рішень залишаються обмеженими.

Щоб подолати зазначені недоліки, у сучасних автономних роботах упроваджують модулі самодіагностики на базі DSP та використовують

бездротові комунікації стандарту 802.11. Таке поєднання дає змогу забезпечити як збір даних про стан робота, так і оперативний аналіз параметрів води. Експериментальні дослідження підтверджують ефективність подібної архітектури та її придатність для автономних систем відбору та аналізу проб.

Проектування функціональної схеми автономного підводного робота спирається на фундаментальні принципи Інтернету речей, які визначають архітектуру сучасних розподілених систем моніторингу. Першим ключовим положенням є наявність розвиненої та доступної комунікаційної інфраструктури, яка забезпечує передавання вимірювальних даних у реальному часі. Другим принципом виступає можливість однозначної ідентифікації кожного елементу системи – від окремих сенсорів до виконавчих модулів робота. Третім є забезпечення віддаленого керування та підтримки пристрою через мережеві платформи, включно з локальними шлюзами та хмарними сервісами.

У контексті автономного підводного робота ці принципи означають, що система повинна бути спроектована так, щоб забезпечувати передачу даних у будь-який момент часу, навіть за умов обмеженого або нестабільного зв'язку. Концепція «комунікації будь-де» передбачає використання різних каналів – від Wi-Fi та підводних акустичних модемів до ретрансляції даних після спливання на поверхню. Крім того, автономність передбачає не лише незалежність від оператора, а й самостійне забезпечення енергією, що є критичним для роботів, які тривалий час працюють під водою.

Цінність підходу IoT полягає у поєднанні даних, які надходять від сенсорів, із можливостями інтелектуальної аналітики. Для підводного робота це означає, що зібрані параметри – температура, електропровідність, концентрація кисню чи забруднювачів – повинні оброблятися в реальному часі на борту або передаватися до хмарних сервісів для подальшої інтерпретації. Саме хмарні середовища забезпечують можливість гнучкого аналізу, зберігання та прийняття рішень, що розширює функціонал системи в напрямку прогнозування та виявлення аномалій.

Будь-яка IoT-орієнтована система включає три структурні рівні (рис. 2.2):

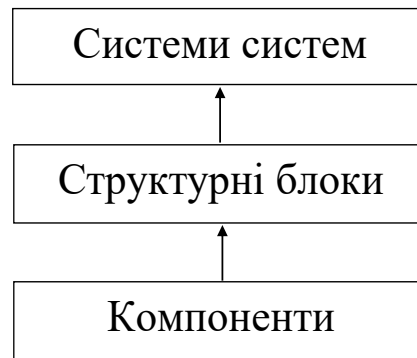


Рис. 2.2 – Рівні IoT систем

Рівень компонентів охоплює сенсори та виконавчі механізми, які формують первинний набір функцій робота. До них належать датчики фізико-хімічних параметрів води, модулі контролю мікроклімату всередині корпусу, навігаційні сенсори, двигуни та приводи системи відбору проб. Кожен компонент орієнтований на виконання конкретного завдання – вимірювання, маніпуляцію або створення руху.

Структурні блоки формують універсальні функціональні вузли, необхідні для роботи більшості автономних систем. Це модулі зв'язку, локальні обчислювальні платформи, блоки безпеки, інтерфейси введення/виведення, системи енергокерування та програмні стекові рішення. До таких блоків також належать протоколи передавання даних (наприклад, MQTT чи IPv6-орієнтовані технології), системи оновлення прошивки, модулі логування та засоби аналізу телеметрії.

Завершальний рівень – система систем, яка описує те, як компоненти та структурні блоки поєднуються у єдину архітектуру. У випадку підводного робота це включає узгоджену роботу сенсорної частини, модулів збору та обробки даних, каналу зв'язку, енергетичного модуля, системи руху та механізму відбору проб. Взаємодія між цими елементами забезпечує не лише отримання даних, але й аналіз, прийняття рішень та автономне виконання місії.

Зростання вимог до екологічного моніторингу призвело до необхідності створення більш складних сенсорних платформ. Сучасні датчики, які реагують на широкий спектр фізико-хімічних змін, разом із можливістю підключення великої кількості сенсорів, збільшили обсяг даних, що потребують обробки. Це, у свою чергу, стимулювало розвиток локальних алгоритмів аналізу, засобів агрегації інформації та побудову систем, здатних працювати у широкому діапазоні умов.

Функціональна схема IoT системи автономного робота представлена на рис. 2.3.

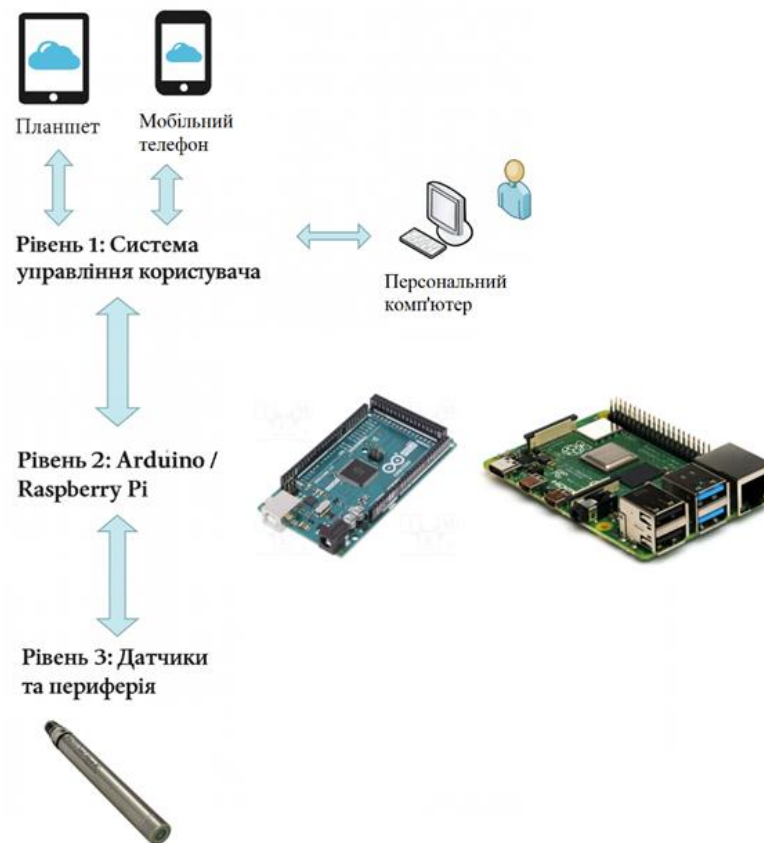


Рис. 2.3 – Функціональна схема IoT системи автономного робота

Дана схема складається з наступних рівнів:

Рівень 1: Система управління користувача включає прикладний програмний інтерфейс та віддалений пристрій, з яких здійснюється контроль системи та моніторинг показників датчиків якості води. Оператор може

ініціалізувати маршрут руху робота, швидкість переміщення та час перебування в точках відбору проб.

Рівень 2: Центральний керуючий пристрій (вбудований мікропроцесор) забезпечує взаємодію між користувацькою системою та виконавчими модулями за моделлю клієнт-сервер. Цей рівень відповідає за обробку команд навігації, координацію роботи датчиків та передачу даних через бездротову мережу.

Рівень 3: Виконавчі модулі включають:

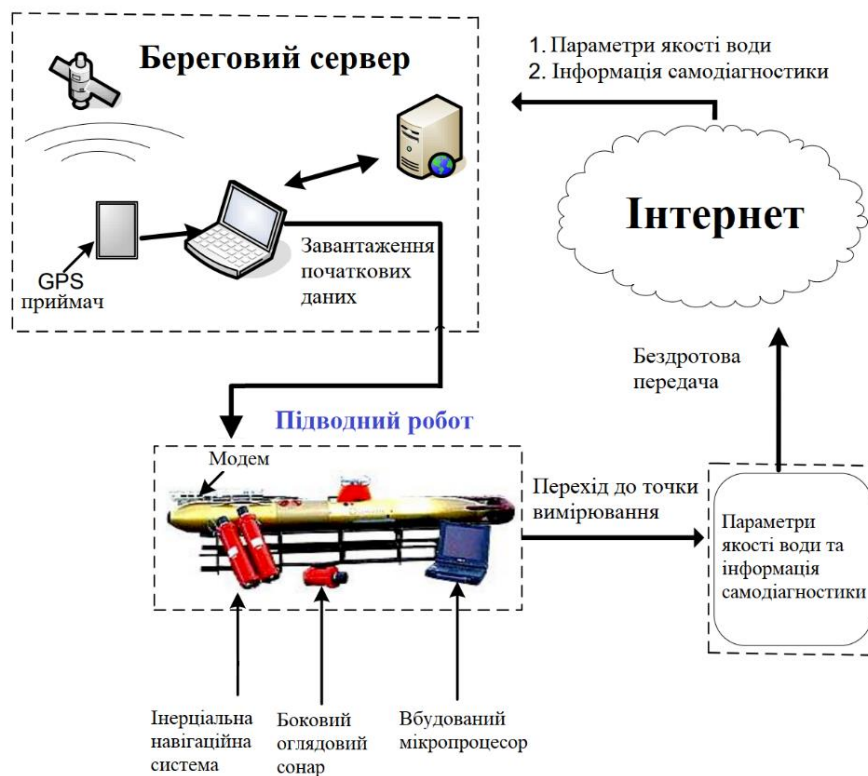
- Датчики якості води (температура, каламутність, розчинений кисень, pH, ORP);
- Навігаційні пристрої (GPS-приймач, електронний компас, сонар);
- Модуль самодіагностики на базі DSP;
- Приводи та керуючі механізми.

Розробка функціональної схеми автономного робота для відбору та аналізу проб води базується на інтеграції сучасних технологій автоматизації, бездротового зв'язку та інтелектуальної обробки даних. Система повинна забезпечувати автономне переміщення по водній поверхні, відбір проб води, їх первинний аналіз та передачу результатів на береговий пункт управління.

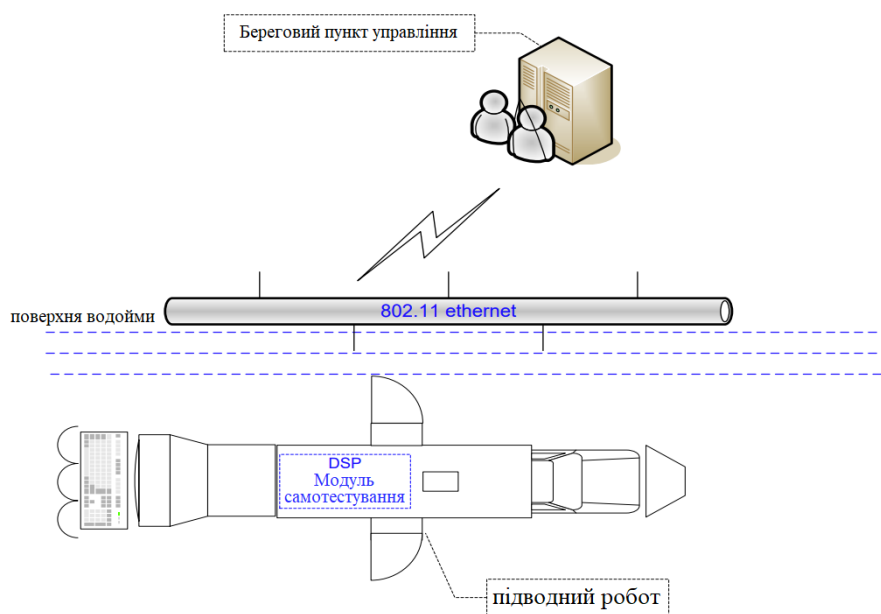
Концепція побудови системи ґрунтується на трьох основних принципах сучасної робототехніки: по-перше, автономність навігації та управління; по-друге, можливість віддаленого моніторингу та контролю; по-третє, самодіагностика та адаптація до умов навколишнього середовища.

Основними компонентами водного робота є: підводний корпус, модуль збору даних про якість води, модуль самотестування та діагностики, модуль бездротового зв'язку та береговий пункт управління. Вимірювальні результати від кожного датчика модуля збору даних передаються до вбудованого мікропроцесора підводного робота.

Функціональна та структурна схеми запропонованої системи представлена на рис. 2.4.



а



б

Рис. 2.4 – Опис системи:

а) функціональна схема; б) структурна схема

Модуль самотестування та діагностики на основі DSP з'єднується з вбудованим мікропроцесором через інтерфейс RS232 і проводить вейвлет-

перетворення інформації від датчиків, генеруючи екстремальні точки, які використовуються для виявлення аномального стану системи.

Береговий пункт управління може обробляти, аналізувати та визначати зібрану інформацію, а потім надавати зворотний зв'язок підводному роботу. Для передачі даних використовується стандарт бездротового зв'язку 802.11 Ethernet, який забезпечує надійну передачу на відстані до 100 метрів при прямій видимості.

Система працює за наступним алгоритмом: береговий комп'ютер ініціалізує маршрут, швидкість та фіксований час тестування підводного робота в зоні дослідження і передає ініціалізовані дані через бездротовий послідовний порт до вбудованого комп'ютера робота. Головна частина робота оснащена антеною та модемом. Вбудований комп'ютер передає отримані дані модему, а потім назад на береговий комп'ютер через антену.

2.3 Алгоритм керування та навігації автономного робота

Автономний робот для моніторингу якості води виконує складний цикл операцій, що вимагає координації роботи навігаційної системи, модулів збору даних та системи самодіагностики. Алгоритм роботи системи складається з декількох послідовних етапів, кожен з яких має критичне значення для успішного виконання місії моніторингу.

1) Ініціалізація та планування маршруту

Береговий комп'ютер ініціалізує параметри маршруту, швидкість та фіксований час тестування підводного робота в зоні дослідження. Оператор використовує картографічний інтерфейс для визначення координат точок відбору проб. Система автоматично розраховує оптимальний маршрут, враховуючи поточні погодні умови, стан заряду батареї та обмеження навігації.

Алгоритм планування маршруту базується на наступних параметрах:

- Географічні координати точок моніторингу (широта, довгота);
- Швидкість руху робота (0.5-2 м/с);

- Час перебування в кожній точці (30-300 секунд);
- Потужність сигналу бездротового зв'язку;
- Рівень заряду акумулятора.

2) Навігація до точки відбору проб

GPS не може точно визначати положення через воду, тому система використовує інерціальну навігаційну систему в поєднанні з GPS-приймачем для точного позиціонування.

Алгоритм навігації представлено на рис. 2.5.

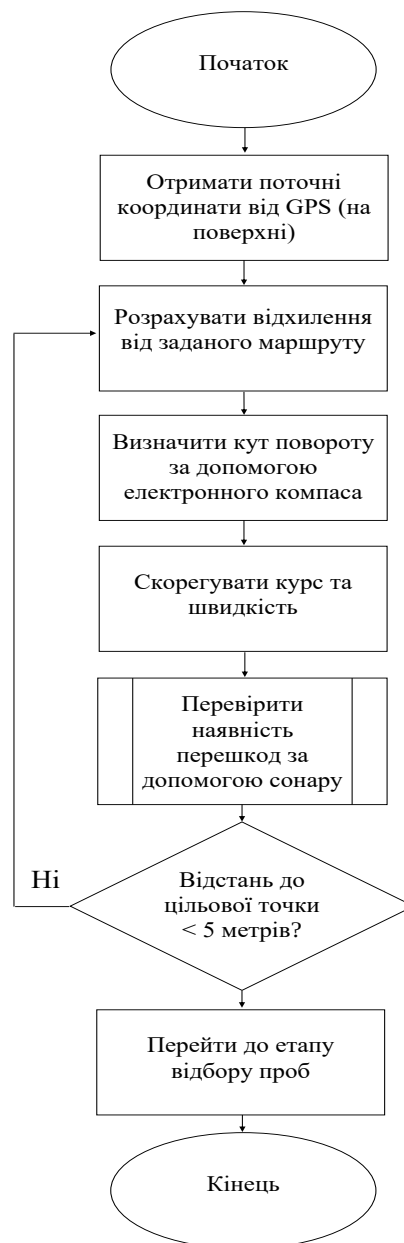


Рис. 2.5 – Алгоритм навігації автономного робота

Електронний компас (модель Honeywell HMR3000) забезпечує точне визначення напрямку руху, а багатопроменевий бічний сканувальний сонар Delta T дозволяє виявляти підводні перешкоди.

3) Відбір та аналіз проб води

Багатосенсорна система збору даних встановлена в підводному роботі та включає датчики температури, каламутності, синьо-зелених водоростей, хлорофілу А, розчиненого кисню, рН та ORP.

Алгоритм відбору проб води представлено на рис. 2.6.

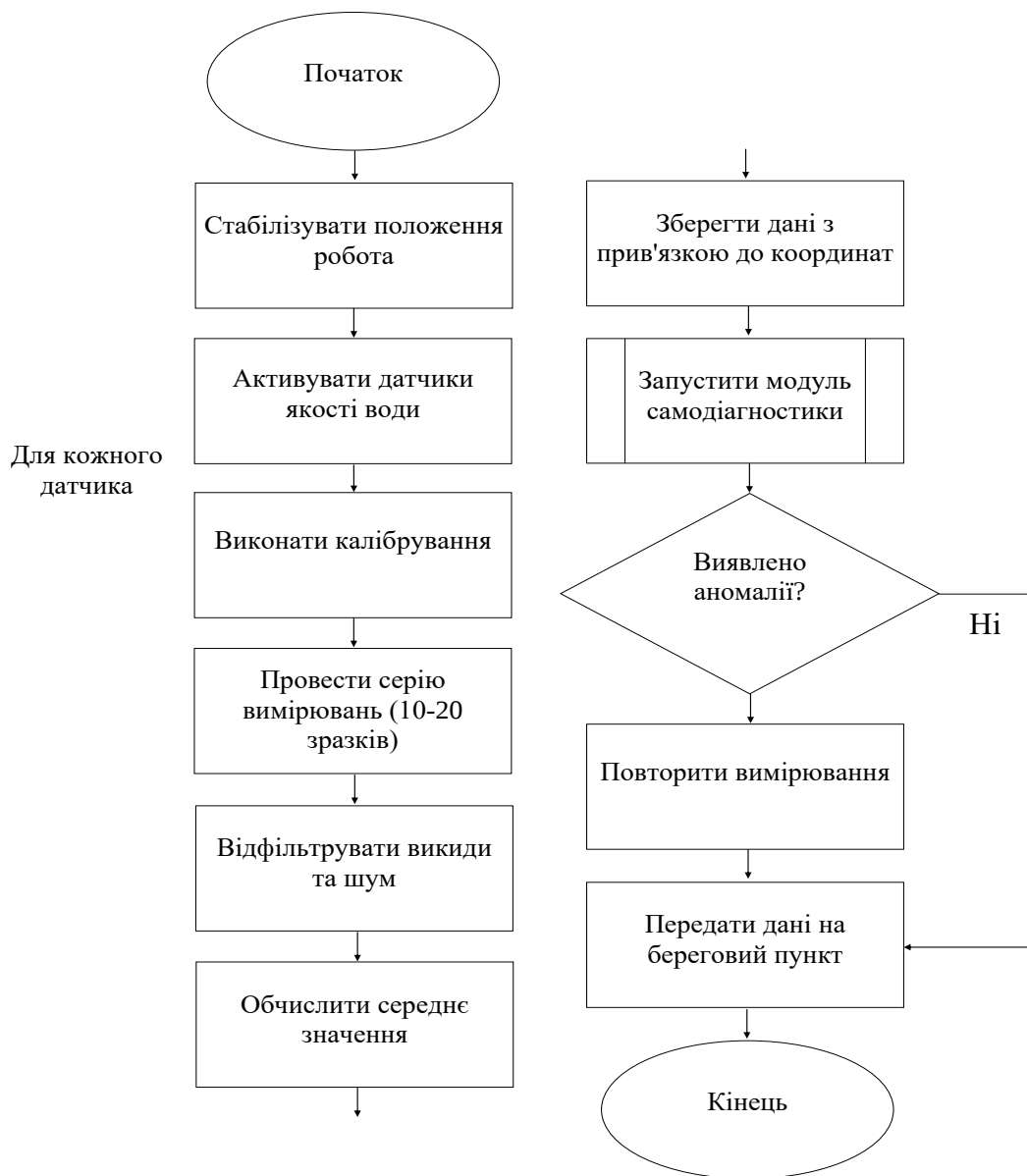


Рис. 2.6 – Алгоритм відбору проб води

4) Самодіагностика системи

Модуль самотестування на основі DSP проводить вейвлет-перетворення сигналів від датчиків для виявлення аномалій. Вхідні та вихідні сигнали системи обробляються за допомогою вейвлет-перетворення, що дозволяє отримати сингулярні точки і видалити екстремальні точки, спричинені мутаціями вхідного сигналу.

Алгоритм самодіагностики представлено на рис. 2.7.

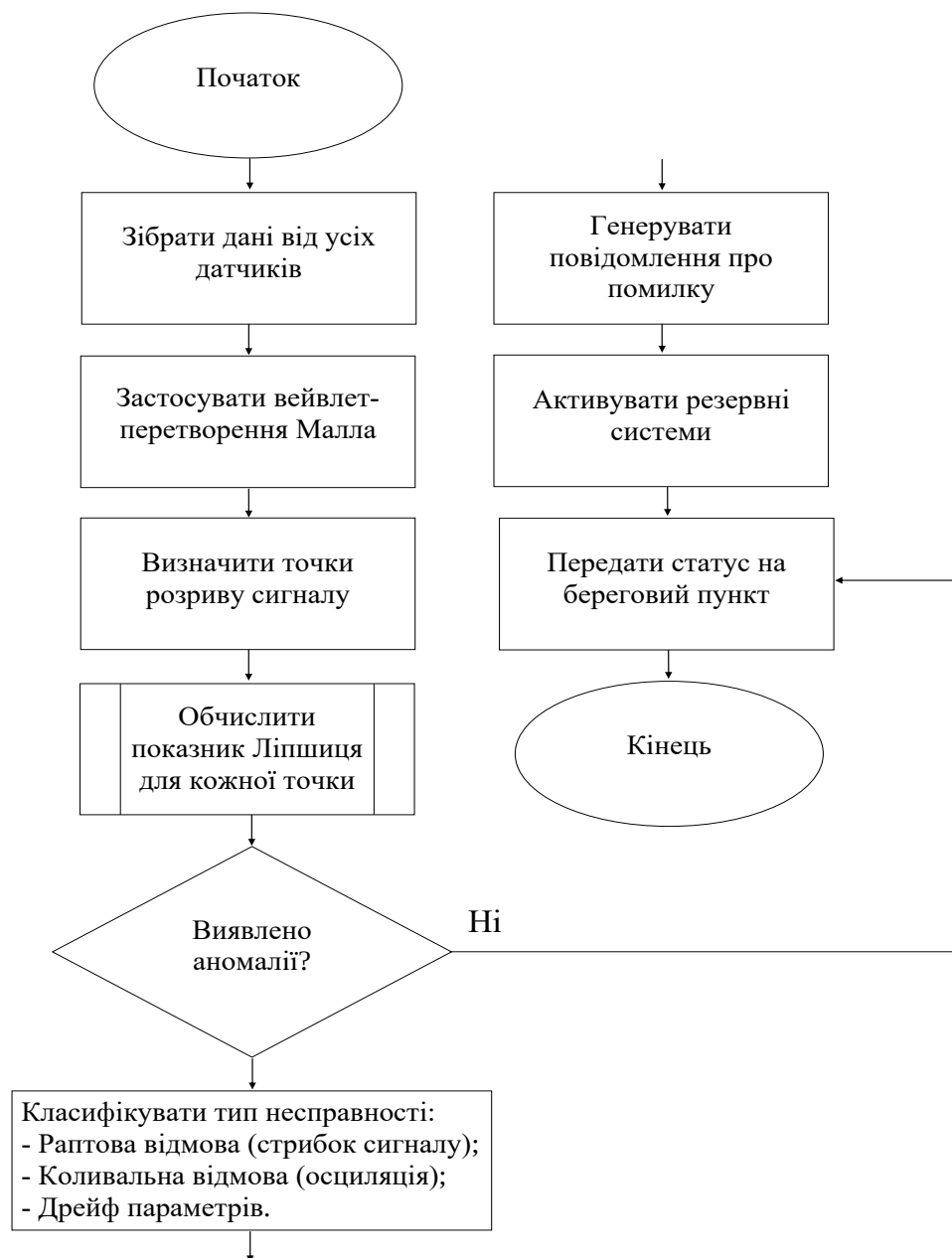


Рис. 2.7 – Алгоритм самодіагностики автономного робота

Метод не вимагає побудови математичної моделі об'єкта діагностики і має низькі вимоги до рівня вхідного сигналу, що забезпечує низьку обчислювальну складність і високу чутливість.

5) Передача даних та повернення

Після завершення збору даних та самотестування в певній точці (широта та довгота), підводний робот негайно піднімається на поверхню води і передає дані на береговий пункт, потім продовжує навігацію до наступної точки, поки всі дані не будуть зібрані або не виникне системна помилка.

Алгоритм передачі даних представлено на рис. 2.8.

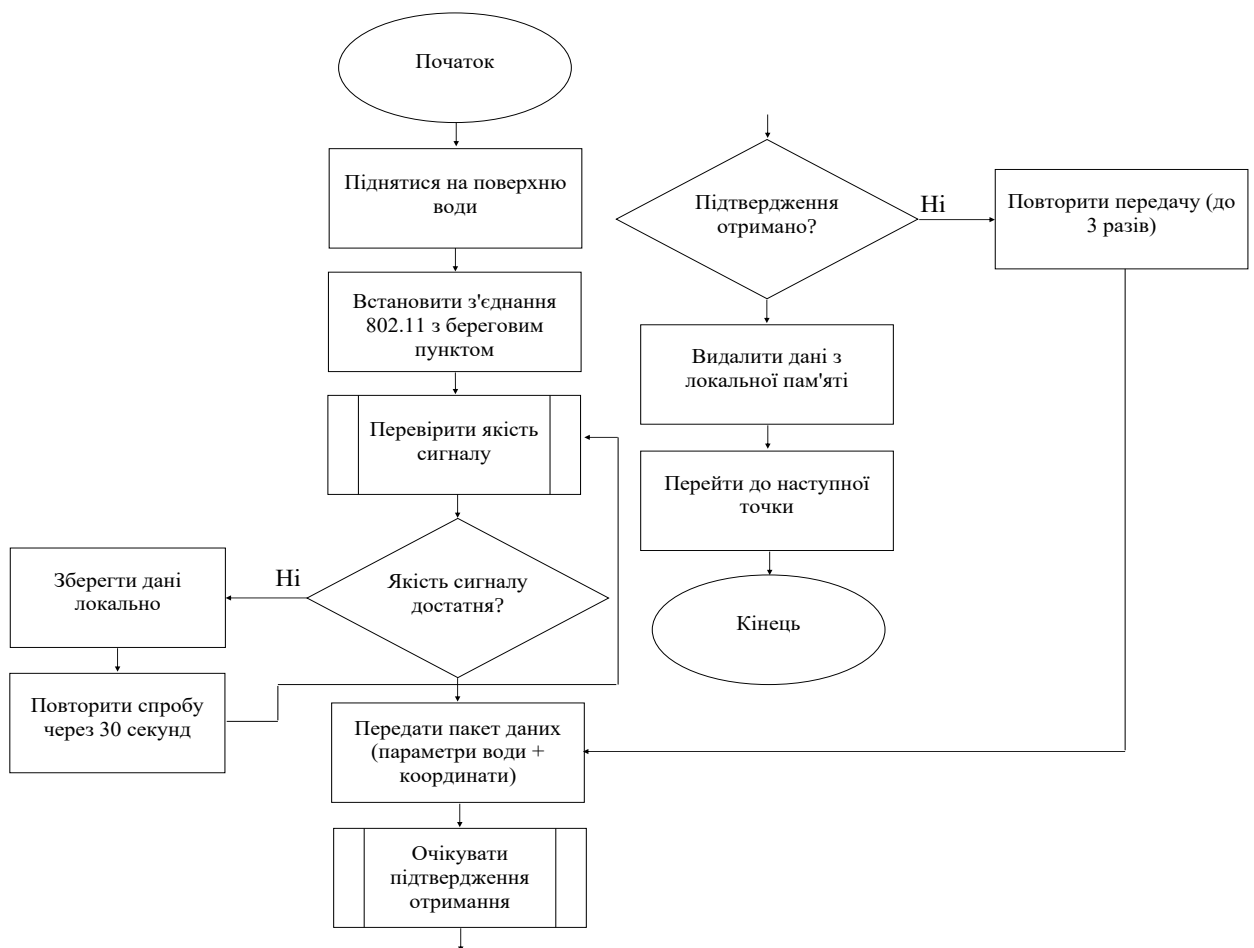


Рис. 2.8 – Алгоритм передачі даних автономного робота

Цей багаторівневий алгоритм забезпечує надійну роботу автономного робота в умовах обмеженої видимості GPS-сигналу, змінних погодних умов та можливих технічних несправностей.

2.4 Опис компонентів автономного робота

Автономний робот для моніторингу якості води складається з інтегрованих апаратних та програмних компонентів, кожен з яких виконує специфічні функції. Розглянемо детально основні модулі системи.

Платформа та корпус робота. Конструкція водного робота (рис. 2.9) має забезпечувати:

- Водонепроникність на глибині до 2 метрів;
- Плавучість для підтримання на поверхні води;
- Стабільність при хвилюванні до 0.5 метра;
- Низький опір руху (гідродинамічна форма).

Корпус виготовляється з високоміцного пластику або композитних матеріалів з антикорозійним покриттям. У носовій частині робота встановлені антена та модем для бездротового зв'язку.

Основні технічні характеристики платформи:

- Довжина: 80-120 см;
- Ширина: 40-60 см;
- Маса: 15-25 кг;
- Швидкість руху: 0.5-2 м/с;
- Автономність: 6-8 годин роботи.

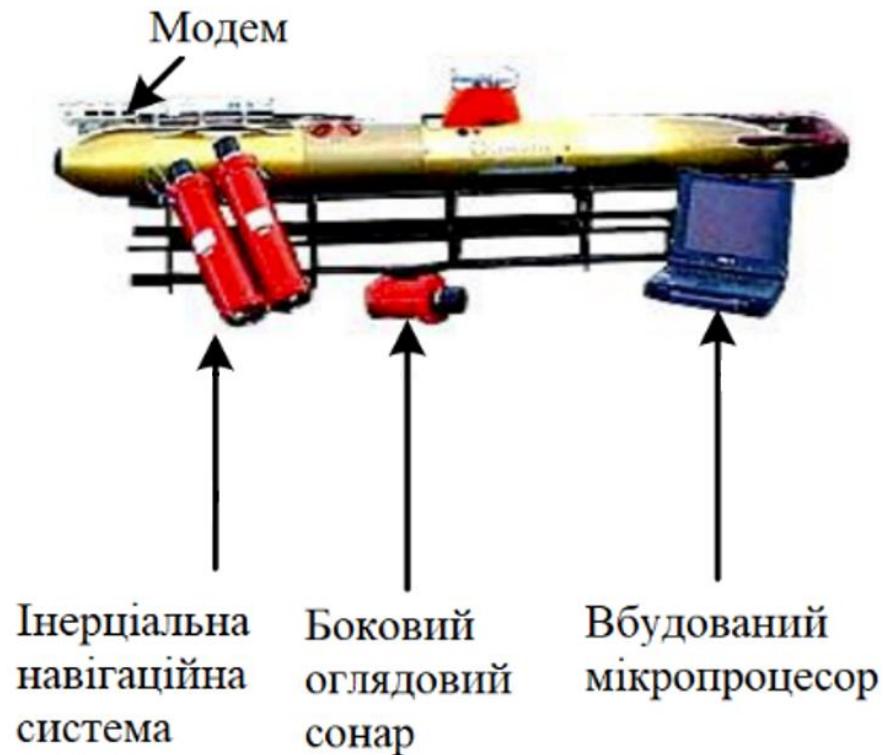


Рис. 2.9 – Конструкція водного робота

Центральний мікропроцесорний модуль. Вбудований мікропроцесор є серцем системи і відповідає за координацію роботи всіх підсистем, обробку навігаційних даних, управління датчиками та організацію бездротового зв'язку.

Для реалізації центрального модуля можуть використовуватися:

1) Одноплатний комп'ютер Raspberry Pi 4 (рис. 2.10):

- Процесор: ARM Cortex-A72 (4 ядра, 1.5 GHz);
- Оперативна пам'ять: 4-8 GB RAM;
- Операційна система: Linux (Raspbian);
- Інтерфейси: GPIO, I2C, SPI, UART, USB, Ethernet;
- Споживання енергії: 3-5 Вт.

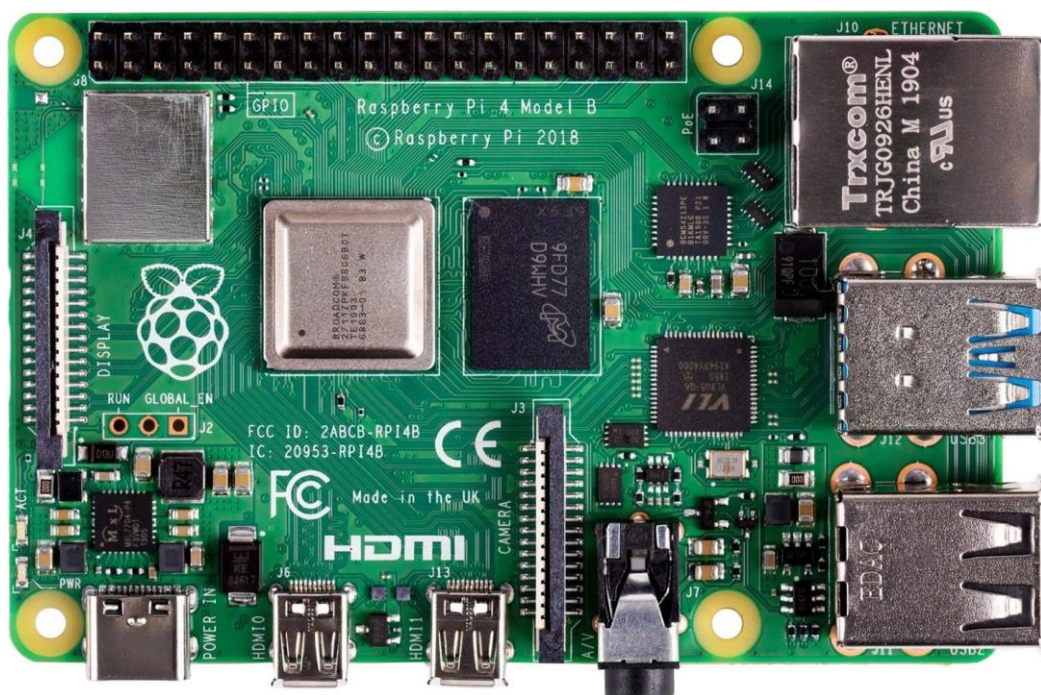


Рис 2.10 – Raspberry Pi 4

Raspberry Pi 4 Model B є високоінтегрованою апаратною платформою, яка знаменує значний еволюційний крок у сегменті одноплатних комп'ютерів (SBC), забезпечуючи рівень продуктивності, раніше недосяжний у цьому форм-факторі та цінovій категорії. Ця платформа функціонує на базі потужного чотириядерного процесора з 64-бітною архітектурою, що дозволяє ефективно виконувати складні обчислювальні завдання, необхідні для реалізації сучасних дослідницьких та інженерних проєктів, включно із застосуваннями у сфері обробки даних, робототехніки та комп'ютерного зору.

Raspberry Pi широко використовується для інтеграції сенсорних вузлів, виконання попередньої обробки та передачі даних у складі різних IoT-систем, включно з екологічними моніторинговими платформами [11].

Обґрунтований вибір Raspberry Pi 4 полягає у його здатності забезпечити високу гнучкість інтеграції завдяки повноцінному набору комунікаційних інтерфейсів. Зокрема, наявність швидкісних портів USB 3.0 та Gigabit Ethernet критично важлива для забезпечення високошвидкісного обміну інформацією з периферійними пристроями та ефективної інтеграції в мережеву інфраструктуру. Окрім того, стандартний 40-контактний роз'єм GPIO є

ключовим механізмом для безпосередньої взаємодії з апаратними компонентами проєкту, дозволяючи розробнику реалізовувати логіку управління низького рівня та взаємодіяти з різноманітними сенсорами й виконавчими механізмами.

Таким чином, Raspberry Pi 4 Model B виступає як оптимальний центральний обчислювальний модуль, що поєднує компактність, енергоефективність і достатню обчислювальну потужність для успішної реалізації поставлених завдань.

2) Промисловий контролер Arduino Mega 2560 (рис. 2.11):

- Мікроконтролер: ATmega2560;
- Тактова частота: 16 MHz;
- Flash-пам'ять: 256 KB;
- SRAM: 8 KB;
- Цифрові входи/виходи: 54;
- Аналогові входи: 16.



Рис. 2.11 – Промисловий контролер Arduino Mega 2560

Промисловий контролер, побудований на основі мікроконтролера Arduino Mega 2560, є спеціалізованою апаратно-програмною платформою, адаптованою для використання в умовах промислової автоматизації та керування технологічними процесами. Вибір саме цього мікроконтролера обумовлений його ключовою перевагою – великою кількістю входів та виходів (I/O), які значно перевищують можливості стандартних платформ. Це дозволяє контролеру ефективно взаємодіяти з великою кількістю датчиків, виконавчих механізмів, реле та індикаційних пристроїв одночасно, що є критично важливим для складних систем керування.

Архітектура Arduino Mega 2560 використовує потужний мікроконтролер Atmel AVR, що забезпечує необхідну стабільність і передбачуваність виконання коду в режимі реального часу, хоча і не позиціонується для завдань, що вимагають високої швидкості обробки сигналів, як DSP або PLC високого класу. Промислова адаптація цієї платформи зазвичай включає додаткові захисні елементи, такі як оптична ізоляція входів та виходів, захист від перенапруги та електромагнітних завад, що дозволяє інтегрувати його у виробниче середовище.

Завдяки широкій підтримці спільноти та простоті програмування через середовище Arduino IDE, ця платформа є оптимальним рішенням для швидкого прототипування, тестування нових алгоритмів керування або реалізації бюджетних систем автоматизації, де висока кількість точок вводу/виводу є пріоритетною вимогою.

Центральний мікропроцесор виконує наступні функції:

- Збір даних від датчиків через послідовні інтерфейси;
- Обробка навігаційних команд;
- Управління двигунами та виконавчими механізмами;
- Організація бездротового зв'язку з береговим пунктом;
- Ведення локального журналу подій.

Модуль самодіагностики на базі DSP. Модуль самотестування та діагностики базується на цифровому сигнальному процесорі (модель TMS320F28335) (рис. 2.12) і з'єднується з вбудованим мікропроцесором через інтерфейс RS232.

Технічні характеристики DSP TMS320F28335:

- Виробник: Texas Instruments;
- Тактова частота: до 150 MHz;
- Flash-пам'ять: 256 KB;
- RAM: 34 KB;
- Інтерфейси: UART, SPI, I2C, CAN;
- АЦП: 12-біт, 16 каналів;
- ШІМ-модулі: 6 каналів.

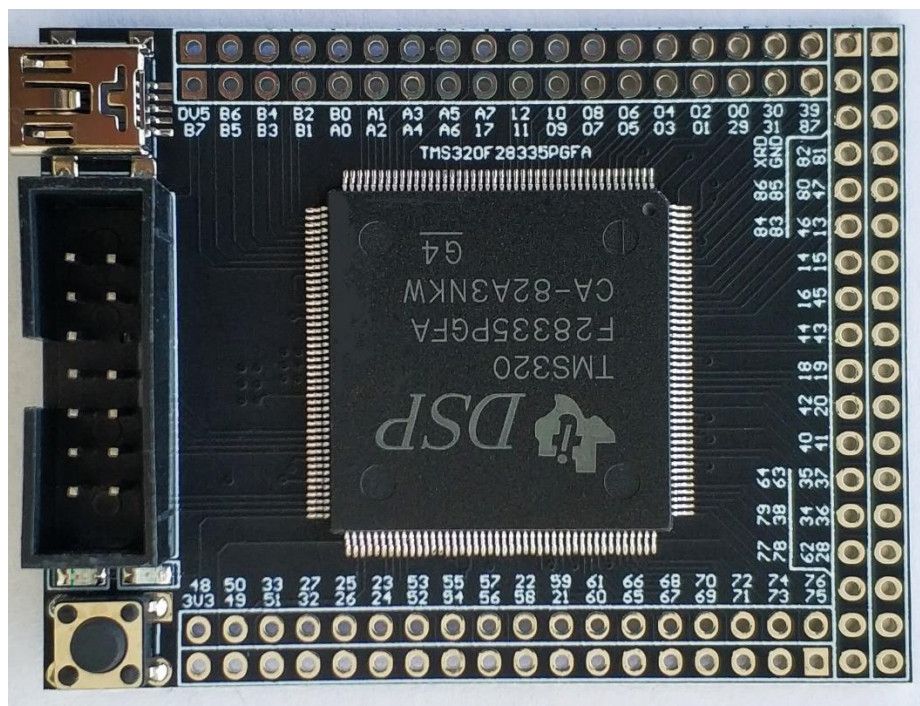


Рис. 2.12 – DSP TMS320F28335

DSP (Digital Signal Processor) – це спеціалізований мікропроцесор, архітектура якого цілеспрямовано оптимізована для швидкої, ефективної та безперервної обробки цифрових сигналів у реальному часі. На відміну від універсальних мікропроцесорів, DSP має унікальні апаратні блоки, такі як

MAC (Multiply-Accumulate) unit, що дозволяє йому виконувати операції множення-накопичення за один такт. Ця можливість є фундаментальною для реалізації ключових алгоритмів обробки сигналів, як-от цифрова фільтрація, швидке перетворення Фур'є (FFT) та кореляція, які вимагають інтенсивних математичних обчислень.

Завдяки цій спеціалізації, DSP ідеально підходить для завдань, де критично важлива низька затримка (latency) та висока швидкість потокової обробки даних, що надходять від аналого-цифрових перетворювачів (АЦП). У контексті моделі TMS320F28335, цей DSP використовується як високоточний та швидкий обчислювальний центр для самотестування та діагностики. Він може швидко аналізувати отримані дані (наприклад, вимірювати напругу, струм, частоту або фазові зрушення) і виявляти аномалії, а потім передавати результати – узагальнені або лише повідомлення про помилку – основному вбудованому мікропроцесору через послідовний інтерфейс RS-232. Це дозволяє розвантажити основний мікропроцесор від ресурсомістких обчислень, делегувавши DSP функцію моніторингу та превентивної діагностики системи.

Апаратний модуль DSP включає блок живлення, шаблон обробки даних DSP, шаблон послідовної комунікації RS232 та модуль керування клавіатурою.

Структура модуля діагностики:

1) Блок живлення та фільтрації:

- Вхідна напруга: 12V DC;
- Вихідні напруги: 5V, 3.3V;
- Захист від перенапруги та короткого замикання.

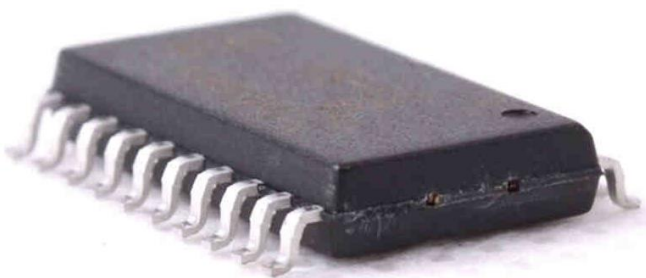
2) Центральний процесор DSP TMS320F28335:

- Виконання вейвлет-перетворень;
- Аналіз сигналів від датчиків;
- Виявлення аномалій;

3) Модуль комунікації RS232. Використовує мікросхему MAX232 та 74CBTD3384 (рис. 2.13) для перетворення рівнів сигналу.



а



б

Рис. 2.13 – Мікросхеми для перетворення рівнів сигналу:

а) MAX232; б) 74CBTD3384

- 4) Зовнішня пам'ять. Мікросхема IS61LV25616 (рис. 2.14) з циклом читання-запису 10 нс та об'ємом 0.5 МВ використовується для зберігання програмного коду та даних комунікації.



Рис. 2.14 – Мікросхема IS61LV25616

Навігаційна система. Навігаційна система робота включає GPS-приймач, електронний компас Honeywell HMR3000, багатопроменевий бічний сканувальний сонар Delta T та датчик глибини NetMind.

GPS-приймач:

- Точність позиціонування: ± 3 метри;

- Частота оновлення: 1-10 Hz;
- Підтримка протоколів: NMEA 0183;
- Робоча напруга: 3.3-5V.

Електронний компас Honeywell HMR3000 (рис. 2.15):

- Точність: ± 0.5 градуса;
- Діапазон: 0-360 градусів;
- Компенсація нахилу: ± 40 градусів;
- Інтерфейс: RS232/RS485;
- Швидкість оновлення: 20 Hz.



Рис. 2.15 – Електронний компас Honeywell HMR3000

Багатопроміньовий сонар Delta T (рис. 2.16):

- Дальність дії: 0.5-100 метрів;
- Кут огляду: 120-180 градусів;
- Роздільна здатність: 1 см;
- Частота: 200-500 kHz.



Рис. 2.16 – Багатопроменевий сонар Delta T

Датчик глибини NetMind:

- Діапазон вимірювань: 0-10 метрів;
- Точність: ± 0.1 метра;
- Вихідний сигнал: 4-20 mA або RS485.

Інерціальна навігаційна система працює в поєднанні з GPS-приймачем для забезпечення точного позиціонування навіть при слабкому GPS-сигналі під водою.

Модуль збору даних про якість води. Багатосенсорна система збору даних встановлена в підводному роботі і підключена до мікропроцесора через асинхронні послідовні інтерфейси передачі даних.

Датчик температури води (рис. 2.17):

- Виробник Atlas Scientific (або промислові RTD, наприклад, Endress+Hauser);
- Модель PT-1000 Platinum Temperature Sensor (або аналог);
- Принцип: Резистивний термометр (RTD);
- Діапазон $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+125\text{ }^{\circ}\text{C}$;

- Точність $\pm(0.15 + 0.002 \cdot t)$;
- Вихід: Аналоговий (зміна опору) або цифровий (після підключення до плати-інтерфейсу).



Рис. 2.17 – Датчик температури води PT-1000

Платинові резистивні датчики (RTD) типу Pt1000 є стандартом для високоточних вимірювань температури у воді. Їх опір при 0 °C становить 1000 Ом. Вони забезпечують високу стабільність і точність, необхідну для корекції показань інших датчиків (як-от DO та pH), чутливих до температурних коливань. Корпус зазвичай виконаний з нержавіючої сталі або титану.

На відміну від дешевих термісторів, Pt1000 мають лінійну залежність опору від температури. Для роботи у складі автоматизованих систем часто використовуються з платами-інтерфейсами (наприклад, від Atlas Scientific або OEM модулями), які перетворюють аналоговий сигнал на цифровий (I2C, Modbus).

Датчик каламутності (турбідності) (рис. 2.18):

- Виробник Endress+Hauser;
- Модель Turbimax CUS52D;
- Принцип: Ослаблення світла (абсорбція) та/або Нефелометрія;

- Діапазон 0.000 до 4000 FNU (Formazin Nephelometric Units);
- Стандарт ISO 7027 (використання інфрачервоного світла 860 нм);
- Вихід: Цифровий (Memosens або Modbus).



Рис. 2.18 – Датчик каламутності Turbimax CUS52D

Endress+Hauser Turbimax CUS52D – це промисловий цифровий датчик, що відповідає стандарту ISO 7027, використовуючи інфрачервоне світло для вимірювання каламутності. Він підходить для моніторингу як питної, так і помірно забрудненої води, забезпечуючи надійність і гігієнічність.

Датчик часто використовує технологію Memosens, яка забезпечує безконтактну передачу даних і живлення, що робить його стійким до вологи та корозії, і спрощує калібрування/обслуговування. Модель працює на принципі ослаблення світла, що особливо ефективно для вимірювання низької та помірної каламутності.

Датчик розчиненого кисню (DO) (рис. 2.19):

- Виробник Hamilton;
- Модель VisiWater DO P Arc 120;
- Принцип: Оптичний (люмінесцентний);

- Діапазон 0.1 ppb до 40 ppm (частин на мільйон);
- Переваги: Не вимагає електроліту, низькі вимоги до обслуговування;
- Вихід: Цифровий (Arc-технологія з ModBus).



Рис. 2.19 – Датчик розчиненого кисню VisiWater DO P Arc 120

VisiWater DO P Arc від Hamilton – це високотехнологічний оптичний датчик, який використовує принцип загасання люмінесценції для вимірювання DO. Оптична технологія значно надійніша за традиційні амперометричні датчики, оскільки не споживає кисень, не потребує заміни мембрани чи електроліту, і на неї менше впливає помутніння води.

Датчик має функцію самодіагностики та забезпечує високу селективність вимірювання, будучи стійким до перешкод від CO₂, H₂S та інших газів. Вбудована технологія Arc дозволяє підключати його безпосередньо до контролерів через цифровий інтерфейс (Modbus), спрощуючи інтеграцію в систему моніторингу.

Датчик pH (рис. 2.20):

- Виробник Hanna Instruments;
- Модель HI1002-4 (Або промисловий електрод HI1043);
- Принцип: Потенціометричний (Скляний електрод);
- Діапазон pH 0 до 14;
- Особливість: Комбінований електрод із вбудованим температурним сенсором;
- Вихід: Аналоговий (BNC-конектор) + температурний вихід.



Рис. 2.20 – Датчик рН HI1002-4

Промислові рН-електроди є комбінованими, тобто поєднують вимірювальний та референтний електроди в одному корпусі. Hanna HI1002-4 (або схожі моделі для безперервного моніторингу) призначені для складних умов, часто мають міцний корпус з PVDF або скла та є герметичними.

Важливою особливістю професійних рН-датчиків є наявність вбудованої температурної компенсації (АТС) для автоматичного коригування показань, оскільки напруга електрода змінюється з температурою. Вони потребують регулярного калібрування за допомогою буферних розчинів (рН 4, 7, 10).

Датчик окисно-відновного потенціалу (ORP) (рис. 2.21):

- Виробник Mettler Toledo;
- Модель InLab ORP Micro (або InPro 3253 для промислового моніторингу);
- Принцип: Потенціометричний (Платиновий електрод);
- Діапазон -2000 мВ до +2000 мВ;
- Електрод: Платинова вимірювальна поверхня, референт Ag/AgCl;
- Вихід: Аналоговий (BNC) або цифровий (залежно від моделі).



Рис. 2.21 – Датчик окисно-відновного потенціалу InLab ORP Micro

ORP-датчики, схожі на рН-електроди, працюють за потенціометричним принципом, але використовують інертний металевий електрод, зазвичай платиновий або золотий. Електрод Mettler Toledo InLab ORP вимірює різницю потенціалів між платиновим сенсором (який збирає електрони) та внутрішнім референтним електродом.

Вимірювання ORP є критичним для контролю ефективності дезінфекції води (хлорування, озонування). Чим вище позитивне значення (наприклад, понад 650 мВ), тим ефективніше працює дезінфекція. Ці датчики відрізняються міцною конструкцією та часто мають керамічні діафрагми для стабільного вимірювання.

Датчик хлорофілу А (рис. 2.22):

- Виробник YSI (Xylem);
- Модель ProDSS Optical Chlorophyll a Sensor (або серія EXO);
- Принцип: Флуорометричний;
- Діапазон 0-400 $\mu\text{g/L}$ (мікрограмів на літр);

- Довжина хвилі: Специфічне збудження для Хлорофілу А (наприклад, 470 нм);
- Вихід: Цифровий (підключення до багатопараметрової платформи/зонду).



Рис. 2.22 – Датчик хлорофілу А ProDSS Optical Chlorophyll a Sensor

Компанія YSI (Xylem) є лідером у виробництві обладнання для моніторингу води. Датчик хлорофілу А, наприклад, для багатопараметрової системи ProDSS або EXO, використовує високочутливу флуорометрію. Він випромінює світло на довжині хвилі, яку поглинає хлорофіл А, і вимірює інтенсивність зворотного флуоресцентного світіння, яка прямо пропорційна концентрації пігменту.

Ці датчики є ідеальними для моніторингу евтрофікації та раннього виявлення "цвітіння" води у водоймах. Вони часто мають вбудовану компенсацію каламутності, яка може спотворювати оптичні вимірювання, забезпечуючи точні результати навіть у забрудненій воді.

Датчик синьо-зелених водоростей (BGA) (рис. 2.23):

- Виробник YSI (Xylem);

- Модель ProDSS Optical Phycocyanin Sensor (BGA-PC);
- Принцип: Флуориметричний;
- Цільовий пігмент: Фікоціанін (Phycocyanin), характерний для прісноводних ціанобактерій;
- Довжина хвилі: Специфічне збудження для Фікоціаніну (наприклад, 590 нм);
- Вихід: Цифровий (підключення до багатопараметрової платформи/зонду).



Рис. 2.23 – Датчик синьо-зелених водоростей (BGA) ProDSS Optical Phycocyanin Sensor

Датчик BGA-Phycocyanin є спеціалізованим флуориметром, який, як правило, інтегрується в ту саму багатопараметрову систему, що й датчик хлорофілу А (наприклад, YSI ProDSS). Його ключова функція – диференціювати потенційно токсичні синьо-зелені водорості (ціанобактерії) від інших видів водоростей.

Він використовує специфічну довжину хвилі для збудження фікоціаніну – пігменту, характерного для BGA. Це дозволяє в реальному часі відстежувати концентрацію токсигенних водоростей і використовувати дані для систем раннього оповіщення про небезпечне "цвітіння", особливо у джерелах питної води.

Усі датчики мають цифровий вихід (RS485, Modbus RTU, SDI-12) або аналоговий вихід 4-20 mA для підключення до мікропроцесора через відповідні інтерфейсні модулі.

Модуль бездротового зв'язку. Система використовує стандарт 802.11 Ethernet для бездротової передачі даних між підводним роботом та береговим пунктом.

Технічні характеристики модуля WiFi:

- Стандарт: IEEE 802.11b/g/n;
- Частота: 2.4 GHz;
- Швидкість передачі: до 150 Mbps;
- Дальність: 100-300 метрів (на відкритій місцевості);
- Потужність передавача: 20 dBm (100 mW);
- Антена: Зовнішня всепрямована 5 dBi.

Модуль модема:

- Тип: Промисловий WiFi-модем;
- Захист: IP67 (водонепроникний);
- Живлення: 12V DC;
- Інтерфейси: Ethernet, RS232, RS485.

Антенa та модем встановлені в носовій частині підводного робота для забезпечення оптимального прийому сигналу на поверхні води.

Протокол передачі даних:

Канальний рівень бездротової мережі використовує протокол CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance) для управління доступом до середовища передачі.

Алгоритм роботи:

- 1) Робот піднімається на поверхню після завершення вимірювань;
- 2) Модем перевіряє зайнятість каналу;
- 3) Якщо канал вільний, починається передача даних;
- 4) Якщо виникає конфлікт, робот чекає випадковий час (алгоритм ВЕВ);
- 5) Після 10-го повторення час очікування стає фіксованим, після 16-го повторення вузол припиняє роботу і надсилає сигнал помилки на береговий пункт.

Система живлення. Автономний робот оснащений акумуляторною батареєю, що забезпечує 6-8 годин безперервної роботи.

Акумуляторна батарея:

- Тип: Li-Ion або Li-Po;
- Напруга: 12V або 24V;
- Ємність: 20-40 Ah;
- Захист: BMS (Battery Management System);
- Водонепроникний корпус.

Розподіл споживання енергії:

- Двигуни та приводи: 40-50%;
- Центральний мікропроцесор: 15-20%;
- Датчики та сенсори: 15-20%;
- Модуль бездротового зв'язку: 10-15%;
- DSP-модуль діагностики: 5-10%.

Система моніторингу заряду:

- Контроль напруги кожної комірки;
- Вимірювання струму розряду;
- Оцінка залишкового заряду (SOC);
- Термоконтроль батареї.

Приводна система. Робот обладнаний електричними двигунами для переміщення по воді та системою рульового управління.

Головні двигуни (2 шт.):

- Тип: Безщітковий DC-мотор;

- Потужність: 50-100 Вт кожен;
- Напруга: 12V або 24V;
- Обертання: 0-3000 об/хв;
- Контролер: ESC з PWM-управлінням.

Рульовий механізм:

- Тип: Сервопривід;
- Зусилля: 10-20 кг·см;
- Кут повороту: ± 45 градусів;
- Швидкість: 0.15-0.20 сек/60°.

Усі компоненти інтегровані в єдину систему через центральний мікропроцесор, що забезпечує скоординовану роботу робота під час виконання місії моніторингу якості води.

Висновки за розділом 2

У результаті розробки компонентів та структурної організації автономного робота для моніторингу якості води вирішено наступні завдання:

1. Обґрунтовано вибір засобів та технологій передачі даних для автономного робота, зокрема проаналізовано застосування бездротових технологій ZigBee, Wi-Fi, Bluetooth та протоколу 6LoWPAN. Визначено, що стандарт IEEE 802.11 Ethernet забезпечує оптимальне співвідношення дальності зв'язку, швидкості передачі даних та енергоефективності для реалізації бездротового каналу між підводним роботом та береговою станцією.
2. Розроблено функціональну схему автономного робота на основі принципів Інтернету речей, яка включає три структурні рівні: рівень компонентів, рівень структурних блоків та рівень системи систем. Запропонована архітектура забезпечує автономне функціонування робота, збір та передачу даних у реальному часі, а також можливість віддаленого керування через хмарні сервіси.

3. Розроблено алгоритми керування та навігації автономного робота, що включають п'ять ключових етапів: ініціалізацію та планування маршруту, навігацію до точок відбору проб, відбір та аналіз проб води, самодіагностику системи на базі вейвлет-перетворень, передачу даних на береговий пункт. Розроблені алгоритми забезпечують надійну роботу в умовах обмеженої видимості GPS-сигналу та можливих технічних несправностей.
4. Здійснено детальний опис та обґрунтування вибору компонентів автономного робота, включаючи центральний мікропроцесорний модуль, модуль самодіагностики на базі DSP, навігаційну систему, багатосенсорну систему моніторингу якості води, модуль бездротового зв'язку та систему живлення. Технічні характеристики обраних компонентів забезпечують автономну роботу протягом 6-8 годин та високу точність вимірювань параметрів води.

Розроблена структурна організація автономного робота підтверджує можливість створення ефективної IoT-системи для моніторингу якості води, яка поєднує автономність, точність вимірювань, надійність передачі даних та адаптивність до умов експлуатації.

РОЗДІЛ 3. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ ОБРОБКИ ТА ДІАГНОСТИКИ СИГНАЛІВ ДАТЧИКІВ АВТОНОМНОГО РОБОТА

3.1 Самотестування та діагностика на основі вейвлет-перетворення

Перетворення Вейвлета дає змогу виявляти різкі зміни у сигналі, що допомагає визначити, коли система переходить у ненормальний режим роботи [12, 13]. Оскільки продуктивні DSP-процесори мають високошвидкісні входи, виходи та швидку передачу даних, поєднання вейвлет-аналізу з DSP є особливо ефективним.

Основний принцип методу самодіагностики, що використовує вейвлет-перетворення, полягає в тому, що вхідний сигнал обробляється цим перетворенням для виявлення точок різкої зміни. Стрибки, спричинені раптовою зміною значення на вході, відсіюються, а ті, що залишилися, відповідають ознакам аномальної роботи системи. Такий підхід не потребує створення математичної моделі об'єкта діагностики та висуває невисокі вимоги до вхідних даних, що зрештою зменшує обчислювальну складність.

Якщо сигнал $f(t) \in L^2(R)$, тоді неперервне вейвлет-перетворення можна подати у такому вигляді:

$$W_f(a, b) = |a|^{-1/2} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \bar{\psi}(a_0^m - nb_0) dt \quad (3.1)$$

Де a – масштабний коефіцієнт, b – коефіцієнт зсуву, а $\psi(t)$ виступає базовою (генеруючою) функцією. Оскільки неперервне вейвлет-перетворення створює значну надмірність даних, масштаб та зсув можна дискретизувати, тобто вибірково відбирати їх значення:

$$a = a_0^{-m} (a_0 > 1) \quad (3.2)$$

$$b = nb_0 a_0^{-m} (b_0 > 1) \quad (3.3)$$

Тоді дискретне вейвлет-перетворення матиме вигляд:

$$D_f(a, b) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) a_0^{m/2} \bar{\psi}(a_0^m - nb_0) dt \quad (3.4)$$

Коли $a_0 = 2$ та $b_0 = 1$. За цих умов отримують двійкове вейвлет-перетворення. Для виконання вейвлет-декомпозиції застосовується алгоритм Маллата, і загальна послідовність дій виглядає так:

$$c_{j,k} = \sum h_{n-2k} c_{j-1,n} \quad (3.5)$$

$$d_{j,k} = \sum g_{n-2k} c_{j-1,n} \quad (j=1, 2, \dots, J) \quad (3.6)$$

Алгоритм відновлення (реконструкції) сигналу можна подати у такому вигляді:

$$c_{j-1,n} = \sum h_{n-2k} c_{j,n} + \sum g_{n-2k} d_{j,n} \quad (j=J, J-1, \dots, 1) \quad (3.7)$$

Якщо функція $f(t)$ або її похідна має розрив у певній точці, то в цій точці вона вважається сингулярною. Ступінь такої сингулярності можна описати показником Ліпшица. Нехай $0 \leq a \leq 1$. Тоді для будь-якого числа t_0 , що наближається до нуля, існує деяке K , для якого виконується рівність:

$$|f(t) - f(t_0)| \leq K |t - t_0|^a \quad (3.8)$$

Тоді можна стверджувати, що функція має показник Ліпшица a у точці t_0 . Величина a характеризує ступінь сингулярності в цій точці: що більше значення a , то слабшою є сингулярність. Зв'язок між сингулярністю та максимальним значенням модуля полягає в тому, що якщо t_0 є точкою сингулярності, то вейвлет-перетворення в цій точці матиме максимум модуля.

Визначивши ці максимуми, можна встановити місце різкої зміни сигналу та момент її виникнення.

У розробленій системі автономного робота для моніторингу якості води вейвлет-перетворення виконує ключову роль у забезпеченні надійності роботи всіх підсистем. Оскільки робот працює в складних умовах водного середовища, де на сигнали датчиків впливають численні перешкоди – колювання хвиль, температурні градієнти, турбулентність води, електромагнітні завади від двигунів – необхідна ефективна система фільтрації та діагностики, яка може відрізнити справжні аномалії від випадкових збурень.

Вибір вейвлет-перетворення для модуля самодіагностики на базі DSP обумовлений декількома факторами. По-перше, цей метод не вимагає складної математичної моделі об'єкта діагностики, що критично важливо для автономної системи, яка повинна працювати без постійного втручання оператора. По-друге, вейвлет-аналіз добре справляється з обробкою нестационарних сигналів, характерних для підводного середовища, де параметри води постійно змінюються.

Архітектура модуля діагностики побудована таким чином, що сигнали від усіх датчиків надходять до DSP-процесора через послідовний інтерфейс RS232. Кожен канал обробляється незалежно, що дозволяє виявляти аномалії в роботі окремих датчиків без впливу на інші канали вимірювання.

Для системи автономного робота особливо важливим є вибір базисної вейвлет-функції. Після аналізу характеристик сигналів від різних датчиків було обрано вейвлет сімейства Daubechies четвертого порядку (db4), оскільки він забезпечує оптимальний баланс між локалізацією в часі та частоті, а також має достатню кількість зникаючих моментів для ефективного подавлення шуму. Цей вибір є компромісним рішенням між точністю виявлення різких змін і обчислювальною складністю алгоритму, що критично важливо для роботи в режимі реального часу на DSP-процесорі з обмеженими ресурсами.

Застосування алгоритму Маллата в системі дозволяє виконувати декомпозицію сигналу на п'ять рівнів, що забезпечує детальний аналіз

частотних компонент від високочастотних перешкод до повільних дрейфів показань датчиків. На першому рівні декомпозиції виявляються високочастотні збурення, спричинені електромагнітними завадами від двигунів та електроніки робота. На другому та третьому рівнях виявляються перешкоди середньої частоти, пов'язані з коливаннями робота на хвилях. На четвертому та п'ятому рівнях аналізуються низькочастотні компоненти, які можуть свідчити про дрейф калібрування датчиків або поступову деградацію сенсорів.

Особливістю реалізації вейвлет-перетворення в системі є використання фіксованої арифметики DSP-процесора замість операцій з плаваючою комою, що значно прискорює обчислення. Коефіцієнти фільтрів вейвлет-перетворення попередньо обчислюються і зберігаються в зовнішній пам'яті, що дозволяє уникнути повторних обчислень під час роботи системи.

Для навігаційних датчиків – GPS-приймача, електронного компаса та сонара – застосовується спеціалізований алгоритм виявлення сингулярностей. Оскільки ці датчики критично важливі для визначення положення робота, будь-які різкі зміни в їхніх показаннях можуть свідчити про втрату сигналу GPS, магнітні аномалії або зіткнення з підводними перешкодами. Система аналізує максимуми модуля вейвлет-перетворення на різних масштабах і порівнює їх з еталонними значеннями, отриманими під час калібрування робота.

Важливим аспектом роботи модуля діагностики є його здатність адаптуватися до змінних умов експлуатації. Наприклад, під час руху робота на високій швидкості рівень вібрацій природно підвищується, що може призвести до хибних спрацювань системи діагностики. Щоб уникнути цього, алгоритм використовує інформацію про поточний режим роботи двигунів, яка надходить від центрального мікропроцесора, і динамічно коригує порогові значення для виявлення аномалій.

Система самодіагностики також відстежує стан самого DSP-процесора – температуру кристала, напругу живлення, кількість обчислювальних циклів на

кадр обробки. Якщо виявляється перегрів процесора або надмірне навантаження, система автоматично зменшує частоту оновлення аналізу або тимчасово відключає обробку менш критичних каналів, щоб гарантувати стабільну роботу найважливіших підсистем робота.

Результати вейвлет-аналізу представляються у вигляді набору характеристичних ознак для кожного датчика: кількість виявлених сингулярностей за останню хвилину, максимальне значення модуля вейвлет-перетворення, рівень шуму на різних масштабах. Ці дані передаються центральному мікропроцесору через інтерфейс RS232 у компактному форматі, що мінімізує навантаження на канал зв'язку. На основі цих даних центральний процесор приймає рішення про необхідність повторного вимірювання, зміни маршруту або передачі попередження на береговий пункт управління.

3.2 Шумозаглушення для сигналу різкої зміни

Щоб підвищити точність самотестування та діагностики й отримати більш надійні результати, необхідно оптимізувати метод вейвлет-аналізу. На малих масштабах коефіцієнти вейвлет-перетворення для шуму мають значні значення, тоді як на великих масштабах їхня амплітуда різко спадає. Тому для високочастотних коефіцієнтів вводять поріг, який дозволяє відсікти вплив шуму в точках різкої зміни сигналу та в околі максимумів модуля вейвлет-перетворення. Зазвичай такий поріг визначають так:

$$\lambda = \sigma \sqrt{2 \log(\text{Num})} \quad (3.9)$$

Де σ – дисперсія шуму, а Num – кількість вейвлет-коефіцієнтів на різних масштабах.

Для обробки сигналу застосовується алгоритм Маллата. Високочастотну складову сигналу, що пройшла через перший рівень вейвлет-перетворення,

важко ідентифікувати. У таких випадках для визначення наявності та місця різкої зміни сигналу використовують більш високі рівні вейвлет-перетворення та обирають відповідну частоту для аналізу. Застосування методу порогового аналізу показало, що різкі зміни сигналу зникають на другому та третьому рівнях вейвлет-перетворення, що суттєво підвищує точність вимірювань.

Процес шумозаглушення в системі автономного робота має критичне значення для забезпечення точності вимірювань параметрів води. Оскільки датчики працюють у складному водному середовищі з численними джерелами перешкод, необхідна багатоступенева система фільтрації, яка може відділити корисний сигнал від різноманітних типів шуму.

Основним джерелом високочастотного шуму в системі є електромагнітні завади від безщіткових DC-моторів, які використовуються для руху робота. Ці двигуни генерують імпульсні перешкоди під час комутації обмоток, які через паразитні ємності та індуктивності проникають у аналогові ланцюги датчиків. Для подавлення цих завад застосовується багаторівневе вейвлет-перетворення з пороговою обробкою високочастотних коефіцієнтів на першому рівні декомпозиції.

Пороговий метод, реалізований у модулі діагностики, використовує адаптивне визначення порогу на основі оцінки середньоквадратичного відхилення шуму. Для кожного каналу датчика дисперсія шуму σ оцінюється за медіаною абсолютних відхилень (MAD) високочастотних вейвлет-коефіцієнтів першого рівня. Цей метод є стійким до викидів і дає надійну оцінку рівня шуму навіть у присутності сингулярностей сигналу.

Для різних типів датчиків застосовуються різні стратегії визначення порогу. Для датчиків температури та pH, які мають відносно повільну динаміку, використовується жорстка порогова функція, яка повністю відсікає коефіцієнти нижче порогу. Це дозволяє максимально зберегти різкі зміни в сигналі, які можуть свідчити про важливі події – наприклад, потрапляння робота в зону термокліну або різкої зміни кислотності води.

Для датчиків розчиненого кисню та каламутності, які більш чутливі до турбулентності води, використовується м'яка порогова функція. Вона не повністю відсікає коефіцієнти, а зменшує їх на величину порогу, що забезпечує більш плавну фільтрацію та зменшує ефект Гіббса – паразитні осциляції на різких переходах сигналу. Це особливо важливо під час руху робота, коли датчики постійно перебувають у потоці води зі змінною швидкістю.

Оптичні датчики хлорофілу А та синьо-зелених водоростей вимагають особливо ретельної обробки сигналу. Ці датчики працюють на основі флуориметрії і чутливі до завад від сонячного світла, яке проникає крізь товщу води на малих глибинах. Для цих датчиків реалізовано комбінований метод порогової обробки: на першому та другому рівнях вейвлет-декомпозиції застосовується м'яка порогова функція для подавлення високочастотного шуму, а на третьому рівні – жорстка функція для збереження характерних піків флуоресценції.

Важливою особливістю алгоритму шумозаглушення є врахування кореляції між різними каналами вимірювання. Наприклад, якщо виявлено різку зміну в показаннях датчика каламутності, система перевіряє, чи відбулися подібні зміни в показаннях датчика хлорофілу А. Якщо так, то ймовірність того, що це справжня зміна параметрів води (наприклад, потрапляння в зону цвітіння водоростей), є високою. Якщо ж зміна виявлена тільки в одному каналі, то більш вірогідно, що це викид, спричинений перешкодою, і відповідні вейвлет-коефіцієнти підлягають більш агресивній пороговій обробці.

Для навігаційних датчиків застосовується спеціалізований алгоритм виявлення та усунення викидів. GPS-приймач може час від часу видавати помилкові координати через багатопроменеве поширення сигналу біля поверхні води або втрату видимості супутників. Електронний компас HMR3000 чутливий до магнітних аномалій від металевих конструкцій або електричних струмів. Сонар може давати хибні відлуння від бульбашок повітря або плаваючого сміття.

Для цих датчиків на другому та третьому рівнях вейвлет-перетворення виконується аналіз модуля коефіцієнтів у часовому вікні. Якщо виявляються ізольовані піки, які не мають відповідних екстремумів на суміжних масштабах, вони класифікуються як викиди і видаляються шляхом інтерполяції сусідніх значень. Цей підхід дозволяє зберегти справжні різкі зміни сигналу (наприклад, при різкому повороті робота або наближенні до перешкоди), відфільтрувавши випадкові збурення.

Після порогової обробки на всіх рівнях декомпозиції виконується зворотне вейвлет-перетворення для реконструкції очищеного сигналу. Оскільки алгоритм Маллата забезпечує точну реконструкцію, відновлений сигнал не має фазових спотворень і затримок, що критично важливо для систем реального часу. Очищені сигнали передаються центральному мікропроцесору для подальшої обробки -- обчислення середніх значень, порівняння з пороговими рівнями якості води, формування пакетів даних для передачі на береговий пункт.

Ефективність алгоритму шумозаглушення безпосередньо впливає на автономність робота. Чим точніше відфільтрований сигнал, тим менша ймовірність хибних спрацювань системи діагностики і непотрібних повторних вимірювань, які витрачають енергію акумуляторної батареї. Крім того, зменшення обсягу шуму в даних дозволяє використовувати більш ефективні алгоритми стиснення при передачі інформації на береговий пункт через бездротовий канал зв'язку 802.11, що також економить енергію та зменшує час перебування робота на поверхні води.

Модуль діагностики також відстежує ефективність процесу шумозаглушення для кожного датчика. Для цього обчислюється відношення сигнал/шум до і після фільтрації. Якщо виявляється, що для певного датчика відношення сигнал/шум залишається низьким навіть після застосування вейвлет-фільтрації, це може свідчити про несправність датчика або його забруднення (наприклад, обростання оптичних вікон водоростями). У такому випадку система генерує попередження і може рекомендувати виключення

цього датчика з подальших вимірювань або планування технічного обслуговування робота.

Важливою перевагою використання вейвлет-перетворення для шумозаглушення є можливість адаптації алгоритму під конкретні умови експлуатації. Перед початком роботи в новій водоймі робот може виконати короткочасний сеанс збору даних для оцінки характеристик шуму в цьому середовищі – рівня електромагнітних завад, інтенсивності хвилювання, прозорості води. На основі цих даних автоматично коригуються порогові значення та параметри вейвлет-перетворення для досягнення оптимальної якості фільтрації в конкретних умовах.

Висновки за розділом 3

У результаті розробки математичного моделювання системи обробки та діагностики сигналів датчиків автономного робота вирішено наступні завдання:

1. Обґрунтовано застосування методу самотестування та діагностики на основі вейвлет-перетворення для виявлення аномалій у роботі системи автономного робота. Показано, що використання неперервного та дискретного вейвлет-перетворення з алгоритмом Маллата дозволяє ефективно виявляти точки різкої зміни сигналів датчиків без необхідності побудови складної математичної моделі об'єкта діагностики. Метод характеризується низькою обчислювальною складністю та високою чутливістю до виявлення сингулярностей, що є оптимальним для реалізації на DSP-процесорі з обмеженими обчислювальними ресурсами.
2. Розроблено багаторівневу систему декомпозиції сигналів на п'ять рівнів вейвлет-перетворення, що забезпечує детальний аналіз частотних компонент від високочастотних електромагнітних завад до низькочастотного дрейфу калібрування датчиків. Реалізовано

спеціалізовані алгоритми виявлення сингулярностей для навігаційних датчиків (GPS, компас, сонар) та датчиків якості води, які враховують специфіку роботи кожного типу сенсорів у водному середовищі та дозволяють адаптуватися до змінних умов експлуатації.

3. Розроблено та реалізовано метод адаптивного порогового шумозаглушення на основі оцінки дисперсії шуму через медіану абсолютних відхилень (MAD). Запропоновано диференційований підхід до вибору порогових функцій: жорстка порогова функція для датчиків з повільною динамікою (температура, рН) та м'яка порогова функція для датчиків, чутливих до турбулентності води (розчинений кисень, каламутність). Показано, що застосування порогового аналізу на другому та третьому рівнях вейвлет-перетворення суттєво підвищує точність виявлення справжніх аномалій та усуває вплив випадкових викидів.
4. Впроваджено систему багатоканальної кореляційної обробки сигналів, яка дозволяє відрізнити справжні зміни параметрів води від випадкових перешкод шляхом аналізу узгодженості змін у різних каналах вимірювання. Реалізовано механізм адаптивного коригування порогових значень залежно від режиму роботи робота (швидкість руху, рівень вібрацій), що зменшує кількість хибних спрацювань системи діагностики та підвищує енергоефективність автономної роботи.

Розроблене математичне моделювання системи обробки та діагностики сигналів підтверджує можливість створення високонадійного модуля самодіагностики на базі DSP, який забезпечує виявлення аномалій у режимі реального часу з низькою обчислювальною складністю, що є критично важливим для автономного робота з обмеженими енергетичними ресурсами.

РОЗДІЛ 4. МОДЕЛЮВАННЯ ПРОГРАМНО-АПАРАТНОГО КОМПЛЕКСУ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ ЯКОСТІ ВОДИ НА БАЗІ АВТОНОМНОГО РОБОТА ТА БЕРЕГОВОЇ СТАНЦІЇ

4.1 Вибір та обґрунтування програмних засобів для розробки системи моніторингу

Вибір відповідних програмних засобів є критично важливим етапом розробки будь-якого веб-орієнтованого програмного забезпечення. Правильно підібраний технологічний стек забезпечує не лише ефективну реалізацію функціональних можливостей, але й визначає продуктивність, масштабованість та зручність подальшої підтримки розробленого рішення. При виборі програмних засобів необхідно враховувати множину факторів: технічні вимоги проєкту, сумісність між компонентами, підтримку спільноти розробників, наявність документації та перспективи подальшого розвитку технологій.

Огляд сучасних тенденцій розробки програмних платформ підтверджує високу популярність інструментів і мов програмування, які застосовуються для побудови вбудованих систем керування та моніторингу [14].

Для наочного представлення обраного технологічного стеку та взаємозв'язків між його компонентами доцільно розглянути архітектуру системи у вигляді багаторівневої моделі. На рис. 4.1 представлено загальну структуру веб-технологічного стеку, що включає три основні рівні: клієнтський (frontend), рівень обміну даними та серверний (backend). Така архітектура забезпечує чіткий розподіл відповідальності між компонентами системи та дозволяє кожному рівню виконувати специфічні функції незалежно від інших. Взаємодія між рівнями здійснюється через стандартизовані протоколи HTTP/HTTPS та технології асинхронного обміну даними AJAX/REST API. Клієнтський рівень відповідає за представлення інформації користувачу та обробку його дій, рівень обміну даними забезпечує

структуровану передачу інформації у форматі JSON, а серверний рівень відповідає за зберігання та обробку даних у базі MySQL. Така архітектура є стандартом сучасної веб-розробки і забезпечує масштабованість, гнучкість та зручність супроводу системи.

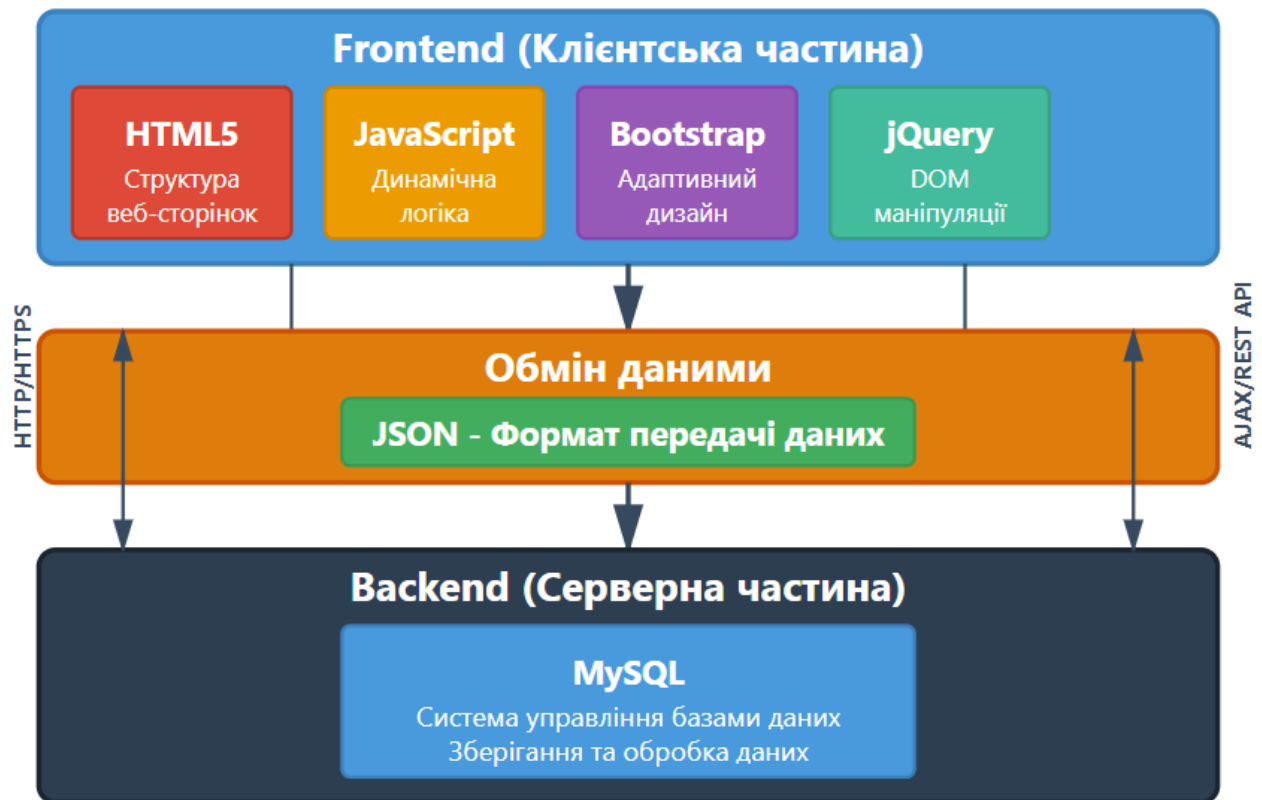


Рис. 4.1 – Архітектура веб-технологічного стеку з розподілом на рівні frontend, обміну даними та backend

HTML5 як основа структури веб-інтерфейсу. HTML5 (HyperText Markup Language version 5) є п'ятою версією мови гіпертекстової розмітки та сучасним стандартом для створення структури веб-сторінок. Ця версія стандарту була офіційно представлена у 2014 році та швидко стала основою сучасної веб-розробки завдяки введенню численних нововведень та покращень порівняно з попередніми версіями.

Основною перевагою HTML5 є підтримка семантичних тегів, які дозволяють більш точно описувати структуру документа. Такі елементи, як `<header>`, `<nav>`, `<section>`, `<article>`, `<aside>` та `<footer>`, забезпечують чітке

визначення призначення різних частин веб-сторінки. Це не лише покращує читабельність коду для розробників, але й позитивно впливає на доступність контенту для пошукових систем та допоміжних технологій.

Важливою особливістю HTML5 є вбудована підтримка мультимедійних елементів. Теги `<audio>` та `<video>` дозволяють безпосередньо вбудовувати медіафайли на веб-сторінку без необхідності використання сторонніх плагінів, таких як Adobe Flash або Microsoft Silverlight. Це значно спрощує розробку та підвищує продуктивність веб-додатків, оскільки браузері можуть нативно обробляти медіаконтент з оптимальною швидкістю.

HTML5 також пропонує розширений набір API (Application Programming Interface) для розробки інтерактивних веб-застосунків. Серед них Canvas API для динамічної візуалізації графіки, Geolocation API для визначення географічного розташування користувача, Web Storage API для локального зберігання даних, та Drag and Drop API для реалізації інтуїтивних інтерфейсів. Ці можливості перетворюють браузер на повноцінну платформу для створення складних додатків.

Крос-браузерна сумісність є ще однією перевагою HTML5. Всі сучасні веб-браузери, включаючи Google Chrome, Mozilla Firefox, Safari, Microsoft Edge та Opera, надають повну підтримку стандарту HTML5. Це забезпечує однакове відображення контенту на різних платформах та пристроях без необхідності написання специфічного коду для кожного браузера окремо.

Адаптивність та мобільна орієнтованість також є ключовими характеристиками HTML5. Стандарт розроблявся з урахуванням потреб мобільної веб-розробки, що дозволяє створювати інтерфейси, які коректно відображаються на екранах різних розмірів та щільності пікселів. Елемент `<picture>` та атрибут `srcset` забезпечують можливість завантаження оптимізованих зображень залежно від характеристик пристрою користувача.

JavaScript та його роль у створенні динамічних інтерфейсів. JavaScript є мовою програмування, яка відіграє центральну роль у сучасній веб-розробці. За даними опитування Stack Overflow Developer Survey 2024 року, JavaScript

використовується більш ніж 65% професійних розробників на щоденній основі, що робить його найпопулярнішою мовою програмування у світі протягом останніх дев'яти років поспіль.

Основне призначення JavaScript полягає у додаванні інтерактивності та динамічної поведінки до веб-сторінок. Ця мова дозволяє реагувати на дії користувача, маніпулювати структурою DOM (Document Object Model), змінювати стилі елементів у реальному часі, виконувати валідацію форм та реалізовувати складну бізнес-логіку на клієнтській стороні. JavaScript перетворює статичні HTML-сторінки на повноцінні інтерактивні додатки.

Важливою перевагою JavaScript є його універсальність. Завдяки платформі Node.js, JavaScript може використовуватися не лише для фронтенд-розробки, але й для створення серверної частини додатків. Це дозволяє розробникам використовувати єдину мову програмування для всього стеку технологій, що значно спрощує розробку та підтримку проєктів.

JavaScript підтримує асинхронне програмування через механізми Promise та `async/await`, що дозволяє ефективно виконувати операції, які потребують часу, без блокування основного потоку виконання. Технологія AJAX (Asynchronous JavaScript and XML) забезпечує можливість асинхронного обміну даними з сервером без перезавантаження веб-сторінки, що значно покращує користувацький досвід та швидкість роботи веб-додатків.

Екосистема JavaScript включає величезну кількість бібліотек та фреймворків, які прискорюють процес розробки. React, Angular та Vue.js є найпопулярнішими фреймворками для створення складних односторінкових додатків (SPA). Ці інструменти надають готові рішення для управління станом застосунку, маршрутизації та оптимізації продуктивності.

Постійний розвиток та еволюція мови є ще однією важливою характеристикою JavaScript. Щорічні оновлення стандарту ECMAScript додають нові можливості та синтаксичні конструкції, які роблять код більш виразним, безпечним та зручним для написання. Сучасні інструменти

транспіляції, такі як Babel, забезпечують можливість використання новітніх можливостей мови навіть у старих браузерях.

Сучасні JavaScript-бібліотеки та вебтехнології широко застосовуються для побудови інтерфейсів візуалізації результатів діагностики, що дозволяє ефективно відображати дані [15].

Bootstrap як фреймворк для швидкої розробки адаптивних інтерфейсів. Bootstrap є безкоштовним CSS-фреймворком з відкритим вихідним кодом, призначеним для швидкої розробки адаптивних та мобільно-орієнтованих веб-інтерфейсів. Створений у 2011 році інженерами компанії Twitter Марком Отто та Джейкобом Торнтоном, Bootstrap швидко став одним з найпопулярніших інструментів для фронтенд-розробки. За даними W3Techs, станом на 2024 рік Bootstrap використовується приблизно на 19% всіх веб-сайтів у світі.

Основною перевагою Bootstrap є наявність великої кількості готових компонентів та утиліт, які значно прискорюють процес розробки інтерфейсів. Фреймворк надає преднастроєні стилі для типографіки, форм, кнопок, таблиць, навігаційних елементів, модальних вікон, випадаючих меню та багатьох інших компонентів користувацького інтерфейсу. Це дозволяє розробникам створювати професійно виглядаючі веб-сторінки без необхідності написання великих обсягів власного CSS-коду.

Адаптивна сіткова система Bootstrap є її ключовою особливістю. Система базується на принципі розподілу ширини екрану на 12 колонок, що забезпечує гнучкість при створенні макетів різної складності. Використовуючи класи `container`, `row` та `col`, розробники можуть легко створювати структури, які автоматично адаптуються до різних розмірів екранів від мобільних телефонів до широкоформатних моніторів.

Bootstrap реалізує концепцію Mobile First, що означає пріоритет дизайну для малих екранів з подальшим розширенням функціональності для більших пристроїв. Такий підхід забезпечує оптимальну продуктивність на мобільних пристроях, які становлять значну частину користувацького трафіку в

сучасному інтернеті. Використання медіа-запитів дозволяє точно контролювати відображення контенту на екранах різних розмірів.

Фреймворк також включає JavaScript-компоненти, які не потребують додаткових залежностей, таких як jQuery у новіших версіях. Ці компоненти забезпечують інтерактивність елементів інтерфейсу, включаючи каруселі зображень, спливаючі підказки, модальні діалоги, випадаючі списки та інші динамічні елементи. Всі компоненти розроблені з урахуванням принципів доступності та юзабіліті.

Крос-браузерна сумісність є ще однією важливою перевагою Bootstrap. Фреймворк гарантує однакове відображення та функціонування інтерфейсу в усіх сучасних веб-браузерах, усуваючи необхідність написання специфічного коду для вирішення проблем сумісності. Це економить значний час розробників та забезпечує консистентний користувацький досвід.

Можливість кастомізації дозволяє адаптувати Bootstrap під специфічні вимоги проєкту. Використовуючи Sass-змінні та міксини, розробники можуть змінювати кольорову схему, розміри елементів, шрифти та інші характеристики дизайну. Модульна архітектура фреймворку дозволяє включати до проєкту лише необхідні компоненти, оптимізуючи розмір фінального CSS-файлу.

jQuery як бібліотека для спрощення роботи з JavaScript. jQuery є компактною та швидкою JavaScript-бібліотекою, створеною для спрощення роботи з HTML-документами, обробки подій, створення анімацій та взаємодії з серверною частиною через AJAX. Представлена громадськості у 2006 році програмістом Джоном Резігом, jQuery швидко здобула популярність завдяки своєму девізу "Write less, do more" ("Пиши менше, роби більше"). За даними на серпень 2022 року, jQuery використовується на 77% з 10 мільйонів найпопулярніших веб-сайтів.

Основною перевагою jQuery є її виразний та інтуїтивно зрозумілий синтаксис. Бібліотека надає єдиний інтерфейс для виконання операцій, які в нативному JavaScript вимагають значно більше коду. Наприклад, вибір

елементів DOM, навігація по структурі документа та маніпуляції з елементами виконуються за допомогою простих та зрозумілих методів, що значно підвищує продуктивність розробника та зменшує ймовірність помилок.

jQuery ефективно вирішує проблеми крос-браузерної сумісності. Різні веб-браузери можуть по-різному реалізовувати окремі можливості JavaScript та DOM, що створює складнощі при розробці. Бібліотека jQuery абстрагує ці відмінності, надаючи консистентний API, який працює однаково в усіх підтримуваних браузерах. Це дозволяє розробникам зосередитися на реалізації функціональності замість боротьби з браузерними особливостями.

Методи jQuery працюють з колекціями елементів, що усуває необхідність написання циклів для обробки множини елементів. Стандартний підхід "вибрати-повторити-змінити", характерний для роботи з нативним DOM, замінюється простішою моделлю, де операції автоматично застосовуються до всіх елементів у виборці. Це значно скорочує кількість коду та робить його більш читабельним.

Можливості анімації jQuery дозволяють легко створювати візуальні ефекти та переходи. Методи для плавного показу та приховування елементів, зміни прозорості, переміщення та зміни розмірів елементів надають розробникам інструменти для створення привабливих користувацьких інтерфейсів без необхідності глибоких знань CSS-анімацій.

Підтримка AJAX у jQuery значно спрощує процес асинхронного обміну даними з сервером. Бібліотека надає зручні методи для виконання HTTP-запитів, обробки відповідей та управління помилками. Це дозволяє створювати динамічні веб-додатки, які оновлюють контент без перезавантаження сторінки, забезпечуючи плавний користувацький досвід.

Величезна екосистема плагінів є ще однією сильною стороною jQuery. Тисячі готових плагінів для різноманітних завдань – від слайдерів та галерей зображень до складних компонентів форм – доступні для безкоштовного використання. Це дозволяє швидко додавати складну функціональність до проєктів без необхідності розробки з нуля.

MySQL як система управління базами даних. MySQL є однією з найпопулярніших систем управління реляційними базами даних (СУБД) з відкритим вихідним кодом. Вперше представлена у 1995 році, MySQL зарекомендувала себе як надійне, швидке та масштабоване рішення для зберігання структурованих даних. За рейтингом DB-Engines Ranking, станом на кінець 2023 року MySQL займає друге місце серед усіх СУБД за популярністю використання, поступаючись лише Oracle Database.

Основною перевагою MySQL є висока швидкість обробки запитів та оптимізація для роботи з великими обсягами даних. СУБД розроблялася з фокусом на продуктивність, що робить її ідеальним вибором для веб-додатків, які потребують швидкого доступу до інформації. Ефективна система індексації, оптимізатор запитів та підтримка різних типів таблиць забезпечують високу швидкодію навіть при обробці мільйонів записів.

Надійність та цілісність даних гарантуються підтримкою транзакцій з дотриманням принципів ACID (Atomicity, Consistency, Isolation, Durability). Це означає, що всі операції з даними виконуються повністю або не виконуються взагалі, забезпечуючи консистентність інформації навіть у випадку системних збоїв. Механізми блокування та ізоляції транзакцій дозволяють безпечно працювати з базою даних у багатокористувацькому середовищі.

Масштабованість є критично важливою характеристикою для сучасних веб-додатків. MySQL підтримує як вертикальне масштабування (збільшення ресурсів окремого сервера), так і горизонтальне масштабування (розподіл навантаження між кількома серверами). Механізми реплікації дозволяють створювати копії бази даних на різних серверах, що підвищує доступність та продуктивність системи.

MySQL є невід'ємною частиною популярного стеку технологій LAMP (Linux, Apache, MySQL, PHP/Python/Perl), який широко використовується для розробки веб-додатків. Інтеграція з мовами програмування, такими як PHP, Python, Java, JavaScript та багатьма іншими, забезпечується через стандартні

драйвери та бібліотеки. Це робить MySQL універсальним вибором для різних типів проєктів.

Гнучкість ліцензування є ще однією перевагою MySQL. СУБД доступна під ліцензією GPL з відкритим вихідним кодом, що дозволяє безкоштовно використовувати її в проєктах з відкритим кодом. Водночас компанія Oracle, яка є власником MySQL, пропонує комерційні ліцензії з додатковою підтримкою та розширеними можливостями для корпоративних клієнтів.

Кросплатформність MySQL забезпечує її роботу на всіх основних операційних системах, включаючи Linux, Windows, macOS, FreeBSD та інших Unix-подібних системах. Це надає розробникам свободу вибору платформи для розгортання та спрощує перенесення додатків між різними середовищами.

Підтримка широкого спектру типів даних дозволяє ефективно зберігати різноманітну інформацію. MySQL підтримує числові типи даних, рядки фіксованої та змінної довжини, дати та час, бінарні дані, JSON, просторові типи для географічних даних та багато інших. Це робить СУБД універсальним інструментом для різних предметних областей.

Архітектура MySQL побудована за принципом багаторівневої моделі, що забезпечує гнучкість, продуктивність та надійність системи. На рис. 4.2 представлено логічну структуру СУБД MySQL, яка складається з трьох основних рівнів: клієнтського, серверного та рівня зберігання даних. Клієнтський рівень забезпечує підключення різних типів клієнтів до сервера бази даних, включаючи веб-додатки, консольні утиліти, графічні інструменти адміністрування та програмні API. Серверний рівень містить ключові компоненти обробки запитів: пул з'єднань, SQL-інтерфейс, синтаксичний аналізатор, оптимізатор запитів, систему кешування та модуль контролю доступу. Рівень зберігання даних представлений різними типами storage engines, кожен з яких оптимізований для специфічних завдань: InnoDB для транзакційних операцій, MyISAM для швидкого читання, MEMORY для роботи в оперативній пам'яті. Така модульна архітектура дозволяє вибирати

оптимальний механізм зберігання для кожної таблиці окремо, максимізуючи продуктивність системи.

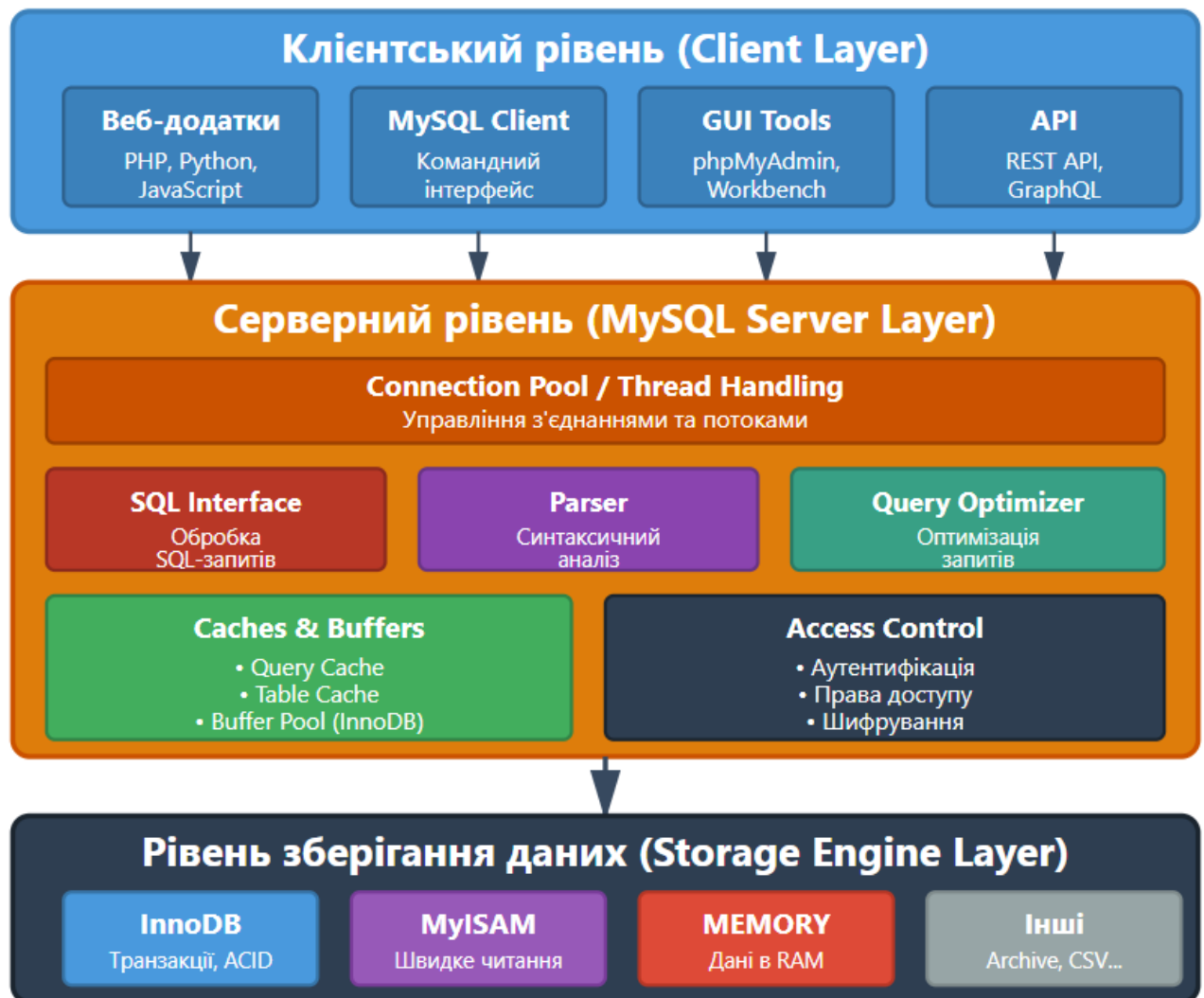


Рис. 4.2 – Логічна архітектура системи управління базами даних MySQL

JSON як формат обміну даними. JSON (JavaScript Object Notation) є легким текстовим форматом обміну даними, який базується на підмножині мови JavaScript. Представлений у 2001 році Дугласом Крокфордом, JSON швидко став стандартом де-факто для передачі структурованих даних між клієнтською та серверною частинами веб-додатків. Формат офіційно стандартизовано у специфікаціях ECMA-404 та ISO/IEC 21778:2017.

Основною перевагою JSON є його простота та зрозумілість для людини. Синтаксис формату базується на двох основних структурах: колекціях пар

ключ-значення (об'єктах) та впорядкованих списках значень (масивах). Завдяки мінімалістичному синтаксису, JSON-дані легко читати та редагувати вручну, що спрощує налагодження та тестування додатків.

Компактність JSON робить його ефективним для передачі через мережу. На відміну від XML, який використовує багатослівний синтаксис з відкриваючими та закриваючими тегами, JSON має мінімальну надлишковість службової інформації. Це зменшує розмір повідомлень, що передаються, економить пропускну здатність каналу зв'язку та прискорює завантаження даних.

Незалежність від мови програмування є ключовою характеристикою JSON. Хоча формат базується на JavaScript, практично всі сучасні мови програмування мають вбудовані або сторонні бібліотеки для парсингу та генерації JSON. Це робить JSON універсальним засобом обміну даними між додатками, написаними на різних мовах програмування та працюючими на різних платформах.

Інтеграція з JavaScript відбувається нативно завдяки методам `JSON.parse()` та `JSON.stringify()`, які дозволяють легко конвертувати JSON-рядки в об'єкти JavaScript та навпаки. Це робить JSON природним вибором для веб-додатків, які активно використовують JavaScript як на клієнтській, так і на серверній стороні через Node.js.

Підтримка вкладених структур даних дозволяє представляти складні ієрархічні дані у зручному форматі. JSON підтримує довільну глибину вкладеності об'єктів та масивів, що дає можливість точно відобразити структуру даних предметної області. Це особливо важливо при роботі з API, які повертають складні структури даних.

Широке застосування JSON у веб-API зробило його стандартом для RESTful сервісів. Більшість сучасних веб-сервісів, включаючи API соціальних мереж, платіжних систем, картографічних сервісів та хмарних платформ, використовують JSON як основний формат для обміну даними. Це створює

консистентну екосистему, де різні сервіси можуть легко взаємодіяти між собою.

Технологія JSONP (JSON with Padding) дозволяє обходити обмеження Same-Origin Policy браузерів, забезпечуючи можливість запити даних з інших доменів через тег `<script>`. Хоча сучасний стандарт CORS (Cross-Origin Resource Sharing) надає більш безпечний спосіб міждоменного обміну даними, JSONP залишається актуальним для підтримки старих браузерів.

Обрані програмні засоби – HTML5, JavaScript, Bootstrap, jQuery, MySQL та JSON – формують цілісний та ефективний технологічний стек для розробки сучасних веб-орієнтованих додатків. Ці технології доповнюють одна одну, забезпечуючи повний цикл розробки від створення структури та оформлення інтерфейсу до реалізації бізнес-логіки, зберігання даних та обміну інформацією.

Вибір саме цих технологій обґрунтовується їхньою зрілістю, широкою підтримкою спільноти розробників, наявністю обширної документації та навчальних матеріалів, а також перевіреною роками надійністю у промисловому застосуванні. Відкритий вихідний код більшості компонентів стеку забезпечує прозорість реалізації, можливість аудиту безпеки та відсутність ліцензійних обмежень.

Крос-платформність та крос-браузерність обраних технологій гарантують широку доступність розробленого рішення для користувачів різних платформ та пристроїв. Підтримка адаптивного дизайну та мобільно-орієнтований підхід відповідають сучасним тенденціям використання веб-додатків переважно з мобільних пристроїв.

Масштабованість та продуктивність технологічного стеку дозволяють створювати рішення, здатні обробляти значне навантаження та великі обсяги даних. Можливості горизонтального та вертикального масштабування забезпечують гнучкість при розширенні функціональності та зростанні кількості користувачів.

Таким чином, обраний комплекс програмних засобів повністю задовольняє технічні вимоги до розробки сучасного веб-додатку, забезпечуючи баланс між функціональністю, продуктивністю, безпекою та зручністю розробки.

4.2 Розробка веб-інтерфейсу системи моніторингу якості води

Для реалізації веб-інтерфейсу системи моніторингу створюємо структуру проєкту з використанням обраних технологій (рис. 4.3).

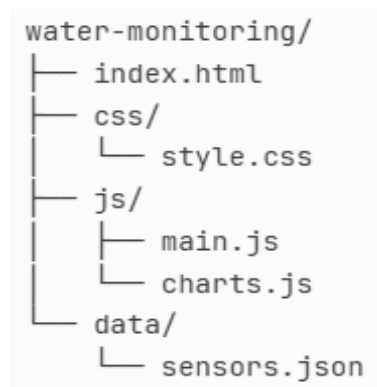


Рис. 4.3 – Структура файлів веб-додатку

Спочатку створюємо головну сторінку `index.html` з адаптивним дизайном на базі Bootstrap. Інтерфейс складається з навігаційної панелі, дашборду з картками датчиків та сторінки статистики з графіками (рис. 4.4).

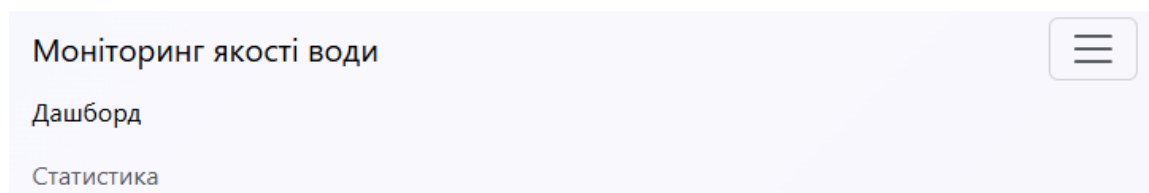


Рис. 4.4 – Навігаційна панель

Приклад коду навігаційної панелі зображено на рис. 4.5.

```

<a class="navbar-brand" href="#"><i class="fas fa-water"></i> Моніторинг якості води</a>
<button class="navbar-toggler" type="button" data-bs-toggle="collapse" data-bs-target="#navbarNav">
  <span class="navbar-toggler-icon"></span>
</button>
<div class="collapse navbar-collapse" id="navbarNav">
  <ul class="navbar-nav ms-auto">
    <li class="nav-item">
      <a class="nav-link active" href="#" data-page="dashboard">
        <i class="fas fa-tachometer-alt"></i> Дашборд
      </a>
    </li>
    <li class="nav-item">
      <a class="nav-link" href="#" data-page="statistics">
        <i class="fas fa-chart-line"></i> Статистика
      </a>
    </li>
  </ul>
</div>

```

Рис. 4.5 – Код навігаційної панелі

Для відображення даних моніторингу створюємо компоненти карток датчиків. Кожна картка містить назву параметру, поточне значення, одиниці вимірювання та індикатор стану (рис. 4.6). Використовуючи Bootstrap, реалізуємо адаптивну сітку, яка автоматично підлаштовується під розмір екрану.

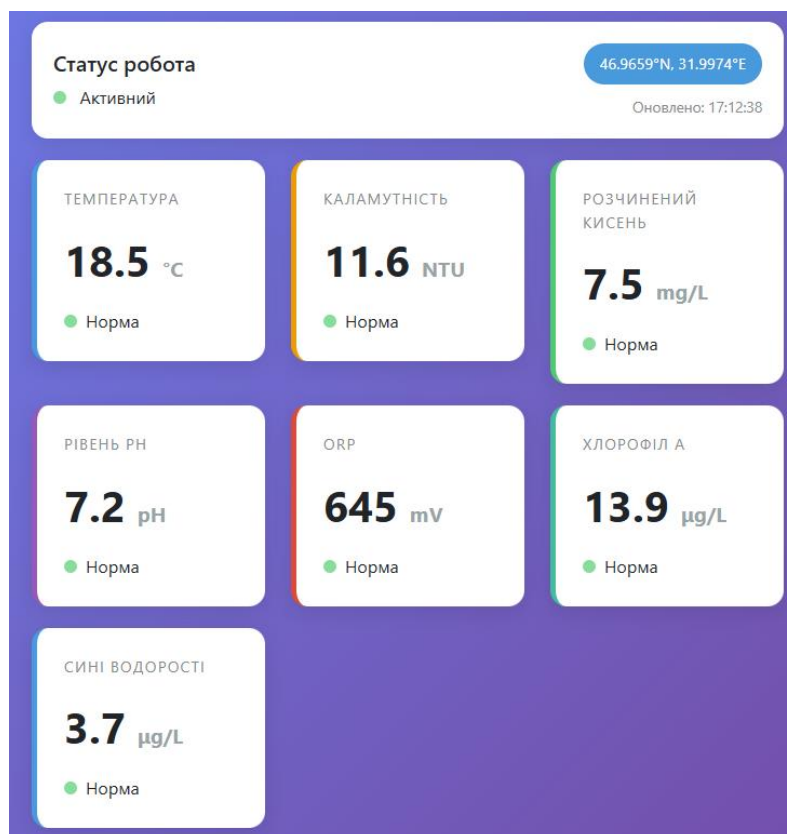


Рис. 4.6 – Картки датчиків у веб-інтерфейсі

Приклад коду карток датчиків та основного інтерфейсу зображено на рис. 4.7.

```
<div class="d-flex justify-content-between align-items-center">
  <div>
    <h5>Статус робота</h5>
    <span class="status-indicator status-good"></span>
    <span id="robotStatus">Активний</span>
  </div>
  <div class="text-end">
    <div class="location-badge">
      <span id="robotLocation">46.9659°N, 31.9974°E</span>
    </div>
    <div class="last-update" id="lastUpdate">Оновлено: щойно</div>
  </div>
</div>
</div>

<div class="row">
  <div class="col-md-4">
    <div class="sensor-card card-blue">
      <div class="sensor-label">Температура</div>
      <div class="sensor-value" id="temp">18.5 <span class="sensor-unit">°C</span></div>
      <div><span class="status-indicator status-good"></span>Норма</div>
    </div>
  </div>
  ...
</div>
```

Рис. 4.7 – Код оформлення карток датчиків та основного інтерфейсу

Для візуалізації історичних даних використовуємо бібліотеку Chart.js, яка дозволяє створювати інтерактивні графіки (рис. 4.8). Реалізовано лінійні графіки для основних параметрів якості води.

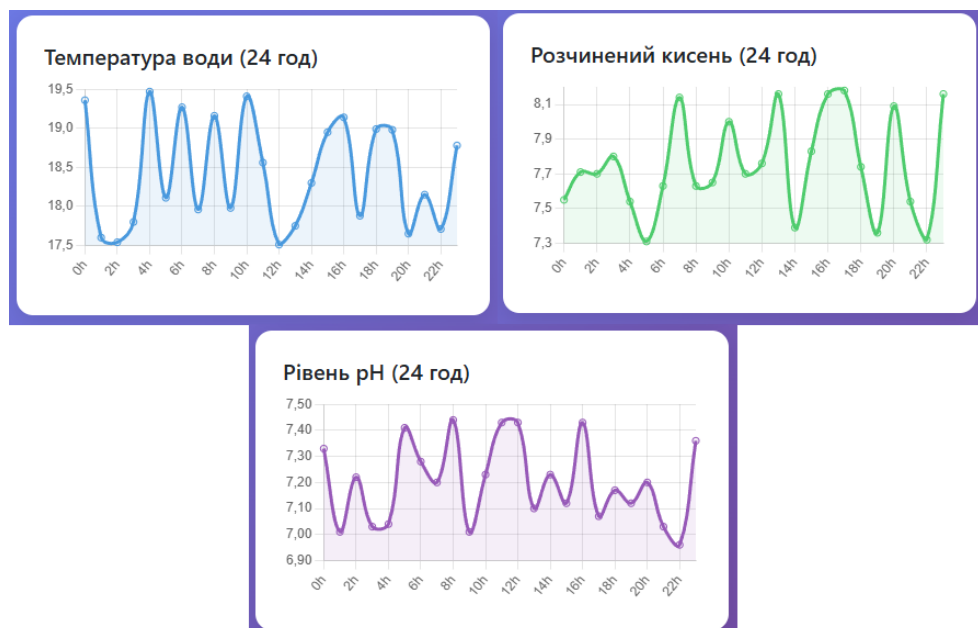


Рис. 4.8 – Графіки моніторингу

Приклад коду для реалізації графіків зображено на рис. 4.9.

```
<!-- Statistics Section -->
<div id="statistics" class="page-section">
  <div class="chart-container">
    <h5>Температура води (24 год)</h5>
    <canvas id="tempChart"></canvas>
  </div>
  <div class="chart-container">
    <h5>Розчинений кисень (24 год)</h5>
    <canvas id="oxygenChart"></canvas>
  </div>
  <div class="chart-container">
    <h5>Рівень pH (24 год)</h5>
    <canvas id="phChart"></canvas>
  </div>
</div>
```

Рис. 4.9 – Код для зображення графіків

Навігація між сторінками реалізована за допомогою jQuery без перезавантаження сторінки. При натисканні на пункти меню відбувається плавне переключення між розділами "Дашборд" та "Статистика" (рис. 4.10).

```
// Навігація
$('.nav-link').click(function(e) {
  e.preventDefault();
  $('.nav-link').removeClass('active');
  $(this).addClass('active');
  $('.page-section').removeClass('active');
  $('#'+$(this).data('page')).addClass('active');
});
```

Рис. 4.10 – Код реалізації функціоналу навігаційної системи

4.3 Реалізація обміну даними та інтеграція з базою даних

Для зберігання даних моніторингу створюємо базу даних MySQL з назвою `water_monitoring`. Структура бази включає таблиці для зберігання показань датчиків, історії вимірювань та налаштувань системи (рис. 4.11).

```
CREATE DATABASE water_monitoring;

CREATE TABLE sensor_data (
    id INT AUTO_INCREMENT PRIMARY KEY,
    timestamp DATETIME DEFAULT CURRENT_TIMESTAMP,
    temperature FLOAT,
    turbidity FLOAT,
    dissolved_oxygen FLOAT,
    ph_level FLOAT,
    orp FLOAT,
    chlorophyll FLOAT,
    bga FLOAT,
    robot_status VARCHAR(50)
);
```

Рис. 4.11 – SQL-код створення структури бази даних

Обмін даними між клієнтською та серверною частинами відбувається у форматі JSON через AJAX-запити. Реалізовано API для отримання поточних даних датчиків та історичних записів (рис. 4.12).

```
// AJAX-запит до API для отримання поточних даних датчиків
fetch('/api/sensors/current')
    .then(response => response.json())
    .then(data => {
        console.log("Поточні показники сенсорів:", data);

        // Приклад обробки отриманого JSON
        document.getElementById('temperature').innerText = data.sensors.temperature + " °C";
        document.getElementById('turbidity').innerText = data.sensors.turbidity + " NTU";
        document.getElementById('ph').innerText = "pH " + data.sensors.ph;
    })
    .catch(error => console.error('Помилка отримання даних:', error));
```

Рис. 4.12 – Код AJAX-запиту для отримання даних

Дані від автономного робота передаються на береговий сервер через бездротовий канал 802.11 у форматі JSON. Після отримання дані записуються в базу MySQL та стають доступними для відображення у веб-інтерфейсі (рис. 4.13).

```
{
  "timestamp": "2024-12-03 14:30:00",
  "location": {"lat": 46.9659, "lon": 31.9974},
  "sensors": {
    "temperature": 18.5,
    "turbidity": 12.3,
    "dissolved_oxygen": 7.8,
    "ph": 7.2,
    "orp": 650,
    "chlorophyll": 15.2,
    "bga": 3.4
  },
  "status": "active"
}
```

Рис. 4.13 – Структура JSON-даних від робота

Система автоматично оновлює дані на дашборді кожні 5 секунд за допомогою функції `setInterval`. При отриманні нових даних відбувається оновлення карток датчиків та графіків без перезавантаження сторінки (рис. 4.14).

```
// Оновлення кожні 5 секунд
setInterval(updateSensorData, 5000);
```

Рис. 4.14 – Код автоматичного оновлення даних

Розроблена система забезпечує безперервний моніторинг якості води з візуалізацією даних у реальному часі та зберіганням історії вимірювань для подальшого аналізу.

Висновки за розділом 4

У результаті моделювання програмно-апаратного комплексу системи моніторингу якості води на базі автономного робота та берегової станції вирішено наступні завдання:

1. Здійснено обґрунтований вибір програмних засобів для розробки системи моніторингу, що включає HTML5 для структури веб-інтерфейсу, JavaScript для реалізації динамічної функціональності, Bootstrap для забезпечення адаптивності та крос-браузерної сумісності, jQuery для спрощення роботи з DOM та обробки подій, MySQL як систему управління базами даних та JSON як формат обміну даними. Обрані технології формують цілісний технологічний стек, що забезпечує ефективну розробку, масштабованість та високу продуктивність системи.
2. Розроблено повнофункціональний веб-інтерфейс системи моніторингу якості води з використанням адаптивного дизайну на базі Bootstrap. Реалізовано навігаційну панель, дашборд з картками датчиків для відображення поточних параметрів води та сторінку статистики з інтерактивними графіками на базі бібліотеки Chart.js. Інтерфейс забезпечує зручну візуалізацію даних у реальному часі та автоматично адаптується до різних розмірів екранів, що дозволяє контролювати систему з будь-яких пристроїв.
3. Реалізовано систему обміну даними між автономним роботом та береговою станцією через бездротовий канал 802.11 з використанням формату JSON та технології AJAX. Розроблено API для отримання поточних даних датчиків та історичних записів без перезавантаження

веб-сторінки. Створено структуру бази даних MySQL для зберігання показань датчиків, історії вимірювань та налаштувань системи, що забезпечує надійне збереження та швидкий доступ до інформації.

4. Впроваджено механізм автоматичного оновлення даних на дашборді з інтервалом 5 секунд, що забезпечує відображення актуальної інформації про стан води в режимі реального часу. Реалізовано плавну навігацію між розділами інтерфейсу без перезавантаження сторінки за допомогою jQuery, що підвищує швидкодію та покращує користувацький досвід при роботі з системою.

Розроблений програмно-апаратний комплекс підтверджує можливість створення ефективної веб-орієнтованої системи моніторингу якості води, яка поєднує автономний збір даних роботом, надійну передачу інформації через бездротовий канал, структуроване зберігання в базі даних та зручну візуалізацію через адаптивний веб-інтерфейс, доступний з будь-яких пристроїв.

ВИСНОВКИ

Під час виконання магістерської кваліфікаційної роботи було розроблено автономного робота для відбору та аналізу проб води. Розроблений робот дозволяє автоматизувати процес екологічного моніторингу водних об'єктів та зменшити вплив людського фактора.

Використання розробленої системи надає такі можливості:

- автоматизований відбір проб води з заданої глибини;
- вимірювання основних фізико-хімічних параметрів води;
- автономне пересування та навігацію у водному середовищі;
- передавання отриманих даних на берегову станцію керування;
- підвищення оперативності та точності контролю стану водних ресурсів.

В цілому розроблена система дозволяє здійснювати комплексний моніторинг якості води, вивчати принципи побудови автономних робототехнічних систем та отримати практичні навички з проєктування апаратно-програмних комплексів, обробки сенсорних даних і побудови алгоритмів керування.

У результаті роботи було створено апаратно-програмний комплекс автономного робота для відбору та аналізу проб води, який може бути використаний у системах екологічного моніторингу та подальших науково-дослідних розробках.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Романенко В.Д., Жукинський В.М., Оксіюк О.П. Методика екологічної оцінки якості поверхневих вод за відповідними категоріями. К.: Символ-Т, 1998. 28 с.
2. UN-Water. The United Nations World Water Development Report 2023: Partnerships and cooperation for water. UNESCO, 2023. URL: <https://www.unesco.org/reports/wwdr/2023/en> (дата звернення 05.12.2025)
3. Koparan C., Koc A.B., Privette C.V., Sawyer C.B. In Situ Water Quality Measurements Using an Unmanned Aerial Vehicle (UAV) System. *Water*, 2018. Vol. 10, No. 3. P. 264.
4. Guo Y., Senthilnath J., Wu W., Zhang X., Zeng Z., Huang H. Radiometric calibration for multispectral camera of different imaging conditions mounted on a UAV platform. *Sustainability*, 2019. Vol. 11, No. 4. P. 978.
5. Pasika S., Gandla S.T. Smart water quality monitoring system with cost-effective using IoT. *Heliyon*, 2020. Vol. 6, No. 7. e04096.
6. Ahmed U., Mumtaz R., Anwar H., Shah A.A., Irfan R., García-Nieto J. Efficient water quality prediction using supervised machine learning. *Water*, 2019. Vol. 11, No. 11. P. 2210.
7. Vermesan O., Friess P. Internet of Things: Converging Technologies for Smart Environments and Integrated Ecosystems. River Publishers, 2013. pp. 153-204.
8. Жураковський Б.Ю., Зенів І.О. Технології Інтернету речей: Навч. посібник. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. 271 с.
9. ДСТУ 4808:2007. Джерела централізованого питного водопостачання. Гігієнічні та екологічні вимоги щодо якості води і правила вибирання. К.: Держспоживстандарт України, 2007. URL: https://environmentallab.com.ua/wp-content/uploads/2021/12/dstu-4808_2007-dzherela-czentralizovanogo-pitnogo-vodopostachannya.-vimogi-shhodo-yakosti-vodi-i-pravila-vibirannya.pdf (дата звернення 05.12.2025)

10. Пулеко І.В., Єфіменко А.А. Архітектура та технології Інтернету речей: Навч. посіб. Житомир: Державний університет «Житомирська політехніка», 2022. 234 с.
11. Upton E., Halfacree G. Raspberry Pi User Guide. 4th Edition. Wiley, 2016. 312 p.
12. Misiti M., Misiti Y., Oppenheim G., Poggi J.M. Wavelet Toolbox User's Guide. The MathWorks Inc.
13. Mallat S. A Wavelet Tour of Signal Processing: The Sparse Way. 3rd Edition. Academic Press, 2008. 832 p.
14. Stack Overflow Developer Survey 2024. URL: <https://survey.stackoverflow.co/2024> (дата звернення 05.12.2025)
15. W3Techs. Usage statistics of JavaScript libraries for websites. URL: https://w3techs.com/technologies/overview/javascript_library (дата звернення 05.12.2025)