

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет комп'ютерно-інформаційних систем і програмної інженерії
(повна назва факультету)

Кафедра комп'ютерних систем та мереж
(повна назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
Осухівська Г.М.
(підпис) (прізвище та ініціали)
«17» листопада 2025 р.

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

на здобуття освітнього ступеня магістр
(назва освітнього ступеня)

за спеціальністю 123 «Комп'ютерна інженерія»
(шифр і назва спеціальності)

студенту Атаманчуку Юрію Андрійовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Методи і засоби адаптивного регулювання параметрів комп'ютерної системи для вирощування промислових видів риб

Керівник роботи Лецишин Юрій Зіновійович, канд. техн. наук, доцент
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом ректора від « 14 » листопада 2025 року № 4/7-987

2. Термін подання студентом завершеної роботи 16 грудня 2025 р.

3. Вихідні дані до роботи модель Емерсона, STM32, LoRa, MQTT, хмарна платформа ThingsBoard

4. Зміст роботи (перелік питань, які потрібно розробити)
Вступ

1 Аналіз процесів в середовищі вирощування промислових видів риб, застосування методів моніторингу для їх автоматизації

2 Методи адаптивного регулювання параметрів в середовищі вирощування промислових видів риб

3 Проєктування та реалізація апаратно-програмного забезпечення системи

4 Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях
Висновки

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, слайдів)
1. Актуальність і мета дослідження.

2. Завдання, об'єкт і предмет, наукова новизна і практична цінність дослідження.

3. Математичні методи та моделі

4. Структурна схема пристрою

5. Передача вимірних даних у хмарне середовище

6. Блок-схема роботи пристрою

7. Результати експериментального дослідження

8. Висновки

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
<i>Охорона праці</i>	<i>Осухівська Г.М., зав.каф. КС</i>	<i>04.12.2025</i>	
<i>Безпека в надзвичайних ситуаціях</i>	<i>Стручок В.С., ст. викл. каф.</i>	<i>05.12.2025</i>	

7. Дата видачі завдання 17.11.2025р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1.	<i>Огляд літературних джерел. Постановка завдання на кваліфікаційну роботу.</i>	<i>17.11.2025р. – 23.11.2025р.</i>	<i>Викон.</i>
2.	<i>Методи адаптивного регулювання параметрів в середовищі вирощування промислових видів риб</i>	<i>24.11.2025р. – 02.12.2025р.</i>	<i>Викон.</i>
3.	<i>Проектування та реалізація апаратно-програмного забезпечення системи</i>	<i>03.12.2025р. – 10.12.2025р.</i>	<i>Викон.</i>
4.	<i>Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях</i>	<i>04.12.2025р. – 10.12.2025р.</i>	<i>Викон.</i>
5.	<i>Оформлення пояснювальної записки і графічного матеріалу</i>	<i>11.12.2025р. – 19.12.2025р.</i>	<i>Викон.</i>
6.	<i>Попередній захист кваліфікаційної роботи магістра</i>	<i>16.12.2025р.</i>	<i>Викон.</i>
7.	<i>Захист кваліфікаційної роботи магістра</i>	<i>22.12.2025</i>	<i>Викон.</i>

Студент

(підпис)

Атаманчук Ю.А.

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

Лецишин Ю. З.

(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Атаманчук Ю.А. Методи і засоби адаптивного регулювання параметрів комп'ютерної системи для вирощування промислових видів риб: робота на здобуття кваліфікаційного ступеня магістра: спец. 123 - комп'ютерна інженерія / наук.кер. Лещишин Ю.З. Тернопіль: Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, 2025.

Ключові слова: комп'ютерна система, аквакультура, адаптивне регулювання, мікроконтролер STM32, LoRa, Інтернет речей, якість води, модель Емерсона.

Кваліфікаційна робота присвячена підвищенню ефективності та надійності функціонування установок замкненого водопостачання шляхом розробки методів і засобів адаптивного регулювання параметрів водного середовища. Робота включає в себе аналіз існуючих методів автоматизації в рибництві та обґрунтовує необхідність врахування нелінійних взаємозв'язків між фізико-хімічними параметрами води.

Отримані дані про стан водного середовища передаються за протоколом MQTT на хмарну IoT-платформу ThingsBoard для візуалізації та диспетчерського контролю. Результати дослідження мають практичне значення для створення автономних систем життєзабезпечення, що дозволяють мінімізувати ризики загибелі риби та зменшити експлуатаційні витрати рибних господарств.

ANNOTATION

Atamanchuk Y.A. Methods and tools for adaptive regulation of the parameters of a computer system for cultivating industrial fish species. Master's Graduation Thesis: speciality 123 - Computer engineering / supervisor Leshchyshyn Y.Z. Ternopil: Ternopil Ivan Puluj National Technical University, 2025.

Keywords: computer system, aquaculture, adaptive control, STM32 microcontroller, LoRa, Internet of Things, water quality, Emerson model.

The Master's graduation thesis is dedicated to increasing the efficiency and reliability of recirculating aquaculture systems operation by developing methods and means of adaptive control of water environment parameters. The work includes an analysis of existing automation methods in fish farming and substantiates the necessity of taking into account nonlinear relationships between physicochemical water parameters.

The obtained data on the state of the water environment are transmitted via the MQTT protocol to the ThingsBoard IoT cloud platform for visualization and dispatcher control. The research results have practical value for creating autonomous life support systems that allow minimizing the risks of fish mortality and reducing the operational costs of fish farms.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ	8
ВСТУП.....	9
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ПРОЦЕСІВ В СЕРЕДОВИЩІ ВИРОЩУВАННЯ ПРОМИСЛОВИХ ВИДІВ РИБ, ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДІВ МОНІТОРИНГУ ДЛЯ ЇХ АВТОМАТИЗАЦІЇ	12
1.1. Аналіз технологічних вимог до параметрів водного середовища	12
1.2. Аналіз існуючих методів та засобів автоматизації в аквакультури.....	15
1.3. Обґрунтування вибору апаратної платформи та інтерфейсів передачі даних	20
РОЗДІЛ 2 МЕТОДИ АДАПТИВНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ В СЕРЕДОВИЩІ ВИРОЩУВАННЯ ПРОМИСЛОВИХ ВИДІВ РИБ.....	23
2.1. Розробка структурної схеми та обґрунтування вибору апаратного забезпечення	23
2.2. Методи організації інформаційного обміну та обробки сигналів у системі	26
2.3. Математичне моделювання динаміки параметрів водного середовища та розрахунків індексів токсичності	31
2.4. Алгоритми адаптивного керування виконавчими механізмами	36
РОЗДІЛ 3 ПРОЄКТУВАННЯ ТА РЕАЛІЗАЦІЯ АПАРАТНО-ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СИСТЕМИ.....	41
3.1. Розробка програмного забезпечення керуючого мікроконтролера	41
3.1.1. Середовище розробки та конфігурація периферії.	41
3.1.2. Програмна реалізація моніторингу.	42
3.1.3. Реалізація алгоритмів адаптивного регулювання.	43
3.1.4. Організація передачі даних через LoRa.	45
3.1.5. Розробка узагальненого алгоритму функціонування системи.	46
3.2. Розробка архітектури шлюзу IoT та інтеграція з хмарною платформою.....	48
3.3. Експериментальні дослідження та верифікація розробленої системи	51
3.3.1. Імітаційне моделювання алгоритму розрахунку токсичності.	51

3.3.2. Дослідження ефективності алгоритмів цифрової фільтрації сигналів.....	52
3.3.3. Моделювання динаміки терморегуляції та перевірка стійкості алгоритму з гістерезисом.	54
РОЗДІЛ 4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ	57
4.1 Охорона праці	57
4.2. Безпека в надзвичайних ситуаціях	59
4.2.1. Аварії на очисних спорудах стічних вод промислових підприємств з масовим викидом забруднюючих речовин.....	59
4.2.2. Організація та основні способи ліквідації наслідків повеней та паводків на промисловому підприємстві.....	60
ВИСНОВКИ.....	63
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	64
Додаток А Тези конференції	
Додаток Б Лістинг програми	

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

CoAP (англ. Constrained Application Protocol) протокол прикладного рівня для обмежених пристроїв

LoRa (англ. Long Range) технологія бездротової передачі даних великого радіусу дії

MQTT (англ. Message Queuing Telemetry Transport) протокол обміну повідомленнями «публікація-підписка»

QoS (англ. Quality of Service) якість обслуговування в мережах передачі даних

DMA (англ. Direct Memory Access) технологія прямого доступу до пам'яті

EMA (англ. Exponential Moving Average) експоненційне ковзне середнє, метод цифрової фільтрації

JSON (англ. JavaScript Object Notation) текстовий формат обміну даними

NTU (англ. Nephelometric Turbidity Unit) нефелометрична одиниця каламутності

ORP (англ. Oxidation-Reduction Potential) окисно-відновний потенціал
ppm (англ. parts per million) мільйонна частка, одиниця вимірювання концентрації

TDS (англ. Total Dissolved Solids) загальна мінералізація води

АСК ТП автоматизована система керування технологічними процесами

ГДК гранична допустима конкентрація

ВСТУП

Актуальність роботи. Розвиток індустріальної аквакультури є стратегічним напрямком забезпечення продовольчої безпеки. Ефективність функціонування об'єкту аквакультури залежить від стабільності гідрохімічних параметрів (температури, кисню, рН, азотних сполук), відхилення яких призводить до значних економічних збитків. Існуючі промислові системи автоматизації є високовартісними та мають закриту архітектуру, а бюджетні рішення часто не враховують нелінійні взаємозв'язки параметрів води, зокрема залежність токсичності аміаку від температури. Окрім того, використання стандартних бездротових технологій (Wi-Fi) у виробничих приміщеннях ускладнене через екранування сигналу. Тому розробка методів адаптивного керування, що поєднують технології LoRa, IoT та інтелектуальні алгоритми на базі мікроконтролерів, є актуальним науково-технічним завданням.

Мета кваліфікаційної роботи. Удосконалення ефективності та безпеки процесу вирощування промислових видів риб за допомогою методів та засобів адаптивного керування параметрами водного середовища.

Завдання кваліфікаційної роботи:

- провести аналіз технологічних вимог до параметрів водного середовища та критично оцінити існуючі методи автоматизації в аквакультурі;
- розробити структурно-функціональну схему комп'ютерної системи з використанням трирівневої архітектури, що включає сенсорний вузол, шлюз та хмарну платформу;
- здійснити математичне моделювання динаміки теплових процесів та хімічної рівноваги токсичних сполук на основі моделі Емерсона для теоретичного обґрунтування алгоритмів керування;
- синтезувати алгоритми адаптивного керування виконавчими механізмами, зокрема нагрівачем, насосами та клапанами, із застосуванням методів цифрової фільтрації та динамічної корекції значень;

– розробити пз для керуючого мікроконтролера STM32 та шлюзу IoT на базі ESP32, а також виконати конфігурування хмарного сервісу ThingsBoard для відображення вимірянних даних.

Об'єкт дослідження: процес адаптивного регулювання параметрів в середовищі вирощування промислових видів риб.

Предмет дослідження: методи і засоби адаптивного регулювання параметрів комп'ютерної системи для вирощування промислових видів риб.

Методи дослідження: У роботі використано методи системного аналізу для розробки архітектури системи, методи математичного моделювання для опису теплових та біохімічних процесів, а також теорію автоматичного керування для синтезу алгоритмів регулювання. Для фільтрації даних сенсорів застосовано методи цифрової обробки сигналів, а для розробки програмного забезпечення - підходи об'єктно-орієнтованого програмування. Перевірка адекватності моделей та коректності роботи алгоритмів здійснена методом комп'ютерного моделювання.

Наукова новизна одержаних результатів:

– удосконалено метод автоматичного керування якістю водного середовища, який, на відміну від існуючих порогових методів, базується на динамічному розрахунку індексу токсичності неіонізованого аміаку з використанням математичної моделі Емерсона. Це дозволяє адаптувати моменти ввімкнення системи очищення до поточних значень температури та рН, що підвищує точність керування та біологічну безпеку об'єкта;

– дістало подальшого розвитку архітектурне рішення розподілених комп'ютерних систем моніторингу, яке відрізняється поєднанням локального контуру керування реального часу на базі STM32 та каналу дальньої телеметрії LoRa з використанням IoT-шлюзу. Це забезпечує автономність та надійність функціонування системи в умовах нестабільного інтернет-з'єднання, зберігаючи при цьому можливість глобального диспетчерського контролю.

Практичне значення результатів кваліфікаційної роботи. Практичним результатом є можливість використання методів, що забезпечують

енергоефективний обмін даними та реалізують адаптивні алгоритми стабілізації параметрів водного середовища.

Публікації. Результати дослідження апробовано на XIV міжнародній науково-технічній конференції молодих учнів та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій», XIII науково-технічній конференції «Інформаційні моделі, системи та технології» у вигляді тез конференцій.

Структура роботи. Робота складається з пояснювальної записки та графічної частини. Пояснювальна записка складається із вступу, 4 розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ПРОЦЕСІВ В СЕРЕДОВИЩІ ВИРОЩУВАННЯ ПРОМИСЛОВИХ
ВИДІВ РИБ, ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДІВ МОНІТОРИНГУ ДЛЯ ЇХ
АВТОМАТИЗАЦІЇ

1.1. Аналіз технологічних вимог до параметрів водного середовища

Сучасне промислове рибництво характеризується інтенсифікацією виробничих процесів. З точки зору теорії автоматичного керування, середовище вирощування промислових видів риб являє собою складний об'єкт з розподіленими параметрами, функціонування якого базується на принципах рециркуляції та регенерації водного ресурсу. Технологічний процес вирощування гідробіонтів у таких системах вимагає суворого дотримання гідрохімічного режиму, оскільки замкнений контур циркуляції призводить до швидкого накопичення продуктів метаболізму та дестабілізації термодинамічної рівноваги системи. Ефективність роботи комп'ютерної системи керування в даному випадку визначається її здатністю підтримувати вектор станів середовища, а саме температуру, газовий склад та концентрацію домішок, у заданій області допустимих значень [4].

Одним із визначальних фізичних параметрів, що підлягає безперервному регулюванню, є температурний режим. Температура води виступає каталізатором біохімічних процесів у системі. Її вплив на об'єкт керування є двояким. З одного боку, вона визначає інтенсивність обмінних процесів у об'єктах вирощування, а з іншого - суттєво впливає на розчинність газів, зокрема кисню та вуглекислого газу, та швидкість хімічних реакцій розпаду органічних речовин. З фізичної точки зору, водне середовище в резервуарах характеризується значною теплоємністю та інерційністю. Це означає, що система має велику постійну часу нагріву та охолодження, що унеможливорює миттєву компенсацію температурних збурень. Тому алгоритми терморегуляції повинні враховувати не лише поточне значення температури, але і швидкість її

зміни, тобто градієнт, а також тепловтрати через конструктивні елементи системи.

Критично важливим завданням автоматизації є контроль газового складу води, зокрема концентрації розчиненого кисню O_2 та вуглекислого газу CO_2 . Розчинність кисню у воді підпорядковується закону Генрі і перебуває в оберненій залежності від температури. При нагріванні води гранично допустима концентрація кисню знижується, тоді як потреба біосистеми в ньому зростає. Це створює нелінійну залежність, яку повинна враховувати система керування аерацією. Накопичення вільного діоксиду вуглецю CO_2 , що є продуктом окислювальних реакцій, призводить до зміни кислотно-лужного балансу води, а саме зниження показника рН. Висока концентрація вуглекислоти блокує здатність води поглинати кисень, що робить моніторинг парціального тиску CO_2 невід'ємною складовою системи життєзабезпечення.

Найбільш складною задачею для комп'ютерної системи керування є моніторинг та нейтралізація азотовмісних сполук. У процесі експлуатації УЗВ відбувається постійне надходження органічного азоту, який в результаті реакцій амоніфікації трансформується в аміак (див. рис. 1.1). У водному розчині аміак перебуває у стані хімічної рівноваги між двома формами. Іонізованим амонієм NH_4^+ та неіонізованим аміаком NH_3 . Співвідношення цих форм не є статичним і визначається рівнянням дисоціації, параметри якого залежать від температури та водневого показника рН середовища. Неіонізований аміак NH_3 є високотоксичною сполукою, концентрація якої не повинна перевищувати соті частки міліграма на літр.

Складність автоматизації цього процесу полягає в тому, що датчики зазвичай фіксують сумарний азот або амоній, тоді як керуюче рішення про включення аварійної заміни води повинно прийматися на основі розрахункової концентрації токсичного NH_3 . Це вимагає від керуючого мікроконтролера реалізації математичної моделі, яка в реальному часі корелює дані з датчиків температури, рН та аміаку для обчислення індексу токсичності.

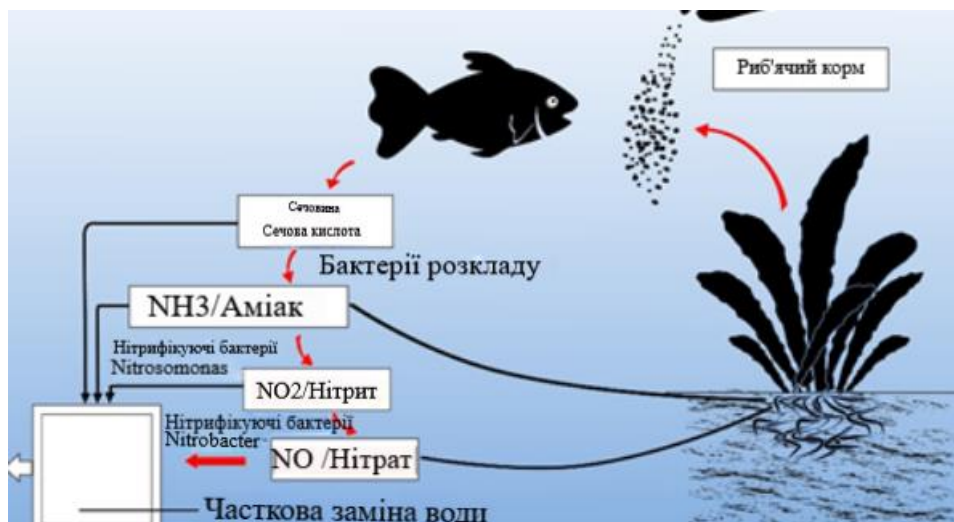


Рис. 1.1. Залежність форм аміаку від фізико-хімічних параметрів

Важливим індикатором загального санітарного стану системи та ефективності роботи фільтраційного обладнання є електропровідність води, або TDS, та окисно-відновний потенціал, відомий як ORP. Показник TDS характеризує сумарну концентрацію розчинених солей та мінералів. У замкненій системі цей параметр має тенденцію до постійного зростання через випаровування води та накопичення продуктів мінералізації. Моніторинг динаміки TDS дозволяє системі керування прогнозувати необхідність оновлення водного ресурсу, тобто проведення заміни води.

Параметр каламутності, або прозорості, води є інтегральним показником роботи механічних фільтрів. Наявність дрібнодисперсних зважених часток не лише погіршує гідрохімічні показники, але й створює додаткове навантаження на систему біологічної очистки. Автоматизований оптичний контроль прозорості дозволяє реалізувати адаптивний алгоритм промивки фільтрів, що базується не на таймері, а на реальному ступені забруднення, що сприяє енергозбереженню та економії води.

Підвищення температури з 10°C до 25°C призводить до зниження концентрації насичення кисню майже на 25%, з 11.3 мг/л до 8.2 мг/л.

Окрім токсичних сполук, критичною характеристикою стабільності водного середовища є його лужність. Цей параметр визначає здатність води протистояти змінам рівня рН при додаванні кислот або основ. У процесі

нітрифікації, тобто біологічного окислення аміаку бактеріями *Nitrosomonas* та *Nitrobacter*, відбувається постійне споживання гідрокарбонатів, що призводить до зниження лужності, що проявляється як падіння рівня рН [5].

Процес нітрифікації є ключовим механізмом самоочищення замкненої системи. Комп'ютерна система керування повинна відстежувати швидкість падіння лужності та, базуючись на цих даних, керувати дозуванням буферних розчинів, наприклад соди або гідроксиду кальцію, для підтримки стабільного кислотно-лужного балансу, необхідного як для риби, так і для колоній корисних бактерій.

Таким чином, об'єкт автоматизації характеризується тісним взаємозв'язком фізичних та хімічних параметрів. Зміна одного показника, наприклад температури, автоматично призводить до зміни інших, зокрема розчинності кисню, токсичності аміаку та рівня рН. Це обумовлює необхідність створення комплексної комп'ютерної системи, яка здатна не лише збирати дані з різномірних сенсорів, але й здійснювати їх перехресний аналіз для формування адекватних керуючих впливів на виконавчі механізми.

1.2. Аналіз існуючих методів та засобів автоматизації в аквакультурі

Ринок сучасних засобів автоматизації гідробіологічних процесів характеризується значною різноманітністю технічних рішень, які відрізняються за архітектурою, функціональними можливостями та вартістю впровадження. Для обґрунтування доцільності розробки власної комп'ютерної системи вирощування промислових видів риб потрібно проаналізувати існуючі аналоги, виявити їхні конструктивні недоліки та обмеження при застосуванні в умовах промислових рибних господарств.

У сегменті промислової аквакультури еталонними вважаються спеціалізовані апаратно-програмні комплекси, побудовані за принципами класичних систем автоматизованого керування технологічними процесами, або АСК ТП. Яскравим представником цього класу є продукція данської компанії ОхуGuard, зокрема платформа Pacific [6]. Дана система базується на модульній

архітектурі, де центральний обчислювальний вузол збирає інформацію від розподілених датчиків та керує виконавчими механізмами, що зображено на рис. 1.2.



Рис. 1.2. Контролер моніторингу параметрів води OxyGuard Pacific

Характерною особливістю таких рішень є використання спеціалізованих зондів розчиненого кисню та рН, які відзначаються високою метрологічною стабільністю та стійкістю до забруднення біоплівкою. Передача даних між компонентами системи здійснюється переважно за допомогою дротових інтерфейсів промислового стандарту, таких як струмова петля 4-20 мА або протокол Modbus RTU.

Головною перевагою розглянутих промислових аналогів є виняткова надійність, захищеність від електромагнітних завад та здатність працювати у важких експлуатаційних умовах протягом тривалого часу. Проте аналіз архітектури подібних систем виявляє суттєві обмеження для їх масового впровадження у малих та середніх рибних господарствах. Насамперед, стримуючим фактором є висока вартість обладнання та необхідність придбання ліцензійного програмного забезпечення, що значно збільшує термін окупності інвестицій. Крім того, дротова топологія мережі вимагає виконання масштабних монтажних робіт з прокладання захищених кабельних трас. В умовах великих площ водного дзеркала або розподілених ставків вартість кабельної інфраструктури та робіт з її захисту від гризунів і вологи може перевищувати

вартість самого вимірювального обладнання. Також слід зазначити, що алгоритми керування у таких системах зазвичай є консервативними і базуються на фіксованих порогових значеннях, тобто гістерезисі, не враховуючи складну динамічну залежність токсичності окремих сполук від температури води, що є однією з ключових задач для розроблюваної комп'ютерної системи вирощування промислових видів риб.

Іншим поширеним класом систем є рішення, що початково розроблялися для морської акваріумістики, але згодом знайшли застосування у лабораторних установках та малих УЗВ. До цієї категорії належать контролери Apex від компанії Neptune Systems [7]. Архітектура даної системи будується навколо центрального блоку керування, до якого через фірмову шину AquaBus підключаються модулі розширення для вимірювання рН, солоності, або провідності, температури та окисно-відновного потенціалу. Система має розвинені можливості хмарного моніторингу, що дозволяє оператору отримувати дані та керувати обладнанням віддалено через мобільний додаток (див. рис. 1.3).



Рис. 1.3. Контролер Neptune Systems Apex

Попри зручність інтерфейсу та модульність, системи цього класу мають низку критичних недоліків при застосуванні у промислових масштабах. По-перше, комунікація між модулями часто здійснюється за допомогою кабелів стандарту USB, довжина яких жорстко обмежена специфікацією інтерфейсу. Це унеможливорює рознесення датчиків на відстань більше кількох метрів від головного блоку, що є неприйнятним для великих цехів. По-друге, функціонування системи значною мірою залежить від підключення до мережі Wi-Fi та доступності хмарного сервісу. У промислових умовах, де ангари часто виготовлені з металоконструкцій, що екранують радіосигнали діапазону 2.4 ГГц, забезпечення стабільного покриття Wi-Fi є складним технічним завданням. Втрата зв'язку з сервером у таких системах часто призводить до втрати можливості оперативного оповіщення персоналу про аварійні ситуації. На відміну від цього, комп'ютерна система вирощування промислових видів риб, що розробляється, використовує технологію LoRa, яка забезпечує надійний зв'язок на великих відстанях та кращу проникаючу здатність сигналу без прив'язки до локальної інфраструктури Wi-Fi.

Окремий підхід до автоматизації демонструють системи, що базуються на фотометричному методі аналізу, наприклад, пристрої Seneye. Замість традиційних електрохімічних електродів, які потребують регулярного калібрування, у таких пристроях використовуються змінні слайди з хімічними реагентами. Оптична система зчитує зміну кольору реагенту, що дозволяє визначати рівень вільного аміаку NH_3 та pH. Хоча цей метод вирішує проблему дрейфу показань електродів, він вимагає щомісячної заміни витратних матеріалів, що суттєво збільшує експлуатаційні витрати. Крім того, дискретність вимірювань у таких системах є низькою, а саме одне вимірювання на 30-60 хвилин, а час реакції на різку зміну параметрів є більшим, ніж у класичних датчиків.

Значний сегмент ринку займають рішення з відкритим вихідним кодом, які часто реалізуються на базі одноплатних комп'ютерів Raspberry Pi або платформ Arduino. Прикладом такого підходу є проєкт Reef-Pi, який дозволяє ентузіастам самостійно збирати контролери, підключаючи різноманітні датчики та релеїні

модулі. Головною перевагою таких рішень є низька вартість апаратної частини та гнучкість програмного забезпечення. Однак використання одноплатних комп'ютерів із повноцінною операційною системою, зазвичай Linux, у системах життєзабезпечення несе в собі ризики зниження надійності. Операційна система загального призначення схильна до пошкодження файлової системи при раптових відключеннях живлення, а процеси оновлення або зависання фонових служб можуть призвести до непередбачуваних затримок у виконанні керуючого алгоритму. На противагу цьому, використання мікроконтролера STM32 у комп'ютерній системі вирощування промислових видів риб забезпечує жорсткий реальний час виконання коду та миттєве відновлення роботи після перезавантаження, що є галузевим стандартом для надійної автоматики.

У статті "Knowledge Based Real Time Monitoring System for Aquaculture Using IoT" [8], К. Раджу та Г. Варма розглядають архітектуру бюджетної системи моніторингу, де акцент зроблено на використанні доступних сенсорів у поєднанні з хмарною аналітикою. Автори доводять, що використання недорогих мікроконтролерів дозволяє знизити вартість точки вимірювання, зберігаючи прийнятну для рибництва точність.

У роботі "Design and Deployment of Low-Cost Sensors for Monitoring the Water Quality", автор Л. Парри [9] зазначає, що головною проблемою стандартних IoT-рішень є висока вартість та складність обслуговування. Їхні дослідження підтверджують ефективність використання спеціалізованих сенсорів у поєднанні з бездротовими мережами для моніторингу стану води в реальному часі.

У дослідженні "Intelligent Prediction and Continuous Monitoring of Water Quality in Aquaculture" [10], Р. Баена-Наварро пропонує використовувати алгоритми машинного навчання для аналізу трендів зміни параметрів води, що дозволяє системі попереджати критичні ситуації, такі як замор риби, ще до моменту досягнення порогових значень.

Проведений порівняльний аналіз дозволяє зробити висновок, що жоден з існуючих на ринку аналогів не задовольняє повною мірою вимоги до сучасної системи моніторингу розподілених об'єктів аквакультури. Промислові рішення є

економічно недоцільними для малих господарств та складними у монтажі через дротову архітектуру. Комерційні побутові системи не забезпечують необхідної надійності зв'язку та автономності. Розроблювана комп'ютерна система вирощування промислових видів риб має унікальну перевагу у вигляді використання енергоефективного протоколу LoRa, що дозволяє розгорнути мережу моніторингу на великих площах без побудови складної інфраструктури. Також важливою відмінністю є реалізація адаптивного алгоритму, який динамічно змінює значення регулювання на основі математичного моделювання токсичності середовища, що підвищує безпеку біологічних об'єктів. Це говорить що дослідження є актуальним та є доцільним створення власного апаратно-програмного комплексу.

1.3. Обґрунтування вибору апаратної платформи та інтерфейсів передачі даних

Створення сучасної комп'ютерної системи вирощування промислових видів риб вимагає виваженого підходу до вибору елементної бази. Враховуючи необхідність забезпечення високої надійності керування технологічним процесом та мінімізації часу реакції на критичні зміни параметрів води, доцільним є використання централізованої архітектури керування, реалізованої на базі одного високопродуктивного обчислювального ядра. Такий підхід дозволяє уникнути проблем синхронізації між різними вузлами керування та спрощує алгоритм прийняття рішень у аварійних ситуаціях.

У якості центрального керуючого пристрою обґрунтовано вибір мікроконтролерів сімейства STM32, що базуються на архітектурі ARM Cortex-M. На відміну від класичних 8-бітних рішень, 32-бітна платформа забезпечує значно вищу обчислювальну потужність. Це є критично важливим для одночасного виконання задач опитування датчиків, реалізації складних математичних моделей розрахунку токсичності та керування виконавчими механізмами в реальному часі.

Визначальним фактором вибору стала наявність у STM32 інтегрованого 12-бітного аналого-цифрового перетворювача, що забезпечує 4096 рівнів квантування. Це дозволяє отримати високу метрологічну точність вимірювань для електрохімічних сенсорів без використання зовнішніх прецизійних мікросхем. Крім того, архітектура STM32 підтримує технологію прямого доступу до пам'яті [11-12]. Використання DMA дозволяє автоматично переносити дані з периферії в оперативну пам'ять без участі центрального процесора, що розвантажує ядро для виконання основного алгоритму керування та забезпечує жорстку детермінованість часових інтервалів, необхідну для коректної роботи протоколу 1-Wire.

Важливим аспектом проектування є організація енергоефективного та надійного дистанційного контролю. Оскільки водні об'єкти часто розташовані на великій відстані від керуючих приміщень, а прокладання дротових ліній зв'язку є економічно недоцільним через великі площі та агресивне середовище, виникає потреба у бездротовому каналі телеметрії. Стандартні протоколи, такі як Wi-Fi або Bluetooth, не забезпечують необхідного радіусу дії та стабільності сигналу в умовах промислових ангарів з металевими конструкціями та високою вологістю, що спричиняє екранування та згасання радіохвиль.

Для вирішення цієї задачі обрано технологію LoRa. Ключова перевага її те, що вона використовує метод частотної модуляції. Це забезпечує унікальну завадостійкість. Приймач здатен демодулювати сигнал, рівень якого нижчий за рівень шуму [13]. LoRa дає можливість для передачі вимірних даних на декілька кілометрів навіть крізь капітальні перекриття, споживаючи при цьому мінімальну кількість енергії. У порівнянні з мережами ZigBee, LoRa не потребує складної комірчастої топології з ретрансляторами, що спрощує розгортання та підвищує надійність мережі. У розробленій системі модуль LoRa використовується для передачі телеметрії та аварійних сповіщень, забезпечуючи автономність локального керування.

Оскільки технологія LoRa забезпечує лише локальну радіомережу, для глобального доступу до системи моніторингу через Інтернет необхідна реалізація шлюзу [14]. Для цієї задачі обґрунтовано вибір мікроконтролера

ESP32 від Espressif Systems. Це інтегрована система на кристалі, що поєднує два обчислювальних ядра Xtensa LX6 та вбудований радіомодуль Wi-Fi/Bluetooth. Двоядерна архітектура дозволяє розділити задачі. Одне ядро обслуговує стек протоколів TCP/IP та шифрування SSL/TLS, що є ресурсомістким процесом, а інше - підтримує безперервний зв'язок з модулем LoRa. Це критично важливо для безпечної передавання вимірних даних у хмару без втрати пакетів телеметрії.

Для візуалізації даних та віддаленого керування обрано IoT-платформу ThingsBoard. Вибір обумовлений її відкритим вихідним кодом та нативною підтримкою протоколу MQTT. На відміну від HTTP, MQTT є легковаговим протоколом, що працює за моделлю «публікація-підписка» та підтримує механізми якості обслуговування. Це гарантує доставку повідомлень навіть при нестабільному інтернет-з'єднанні. ThingsBoard надає потужні інструменти для побудови інтерактивних дашбордів та налаштування правил автоматичного оповіщення, що дозволяє зосередитися на розробці логіки керування технологічним процесом, а не на створенні власного серверного програмного забезпечення.

У першому розділі магістерської роботи проведено комплексний аналіз предметної області дослідження, що дало можливість визначити ключові технологічні вимоги до систем життєзабезпечення. Доведено, що критичними параметрами, які потребують безперервного автоматизованого контролю, є температура, концентрація розчиненого кисню, аміаку, вуглекислого газу, а також рівень мінералізації води.

Виконаний порівняльний аналіз існуючих методів та засобів автоматизації аквакультури виявив, що наявні на ринку промислові рішення є економічно неефективними для малих господарств через високу вартість та складність масштабування, а побутові системи на базі аматорських платформ не забезпечують належного рівня надійності та автономності через повну залежність від стабільності мережі Інтернет. Це підтвердило актуальність розробки спеціалізованої комп'ютерної системи, яка поєднує промислову надійність з доступністю.

РОЗДІЛ 2

МЕТОДИ АДАПТИВНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ В СЕРЕДОВИЩІ
ВИРОЩУВАННЯ ПРОМИСЛОВИХ ВИДІВ РИБ

2.1. Розробка структурної схеми та обґрунтування вибору апаратного забезпечення

Проектування апаратної архітектури комп'ютерної системи базується на принципі централізованого керування технологічним процесом із використанням єдиного обчислювального ядра. Загальна архітектура системи побудована за ієрархічним принципом і включає три взаємопов'язані функціональні рівні. Рівень об'єкта, що охоплює комплекс первинних вимірювальних перетворювачів та виконавчих механізмів, рівень керування, реалізований на базі високопродуктивного мікроконтролера для локальної обробки даних, та рівень комунікації, що забезпечує трансляцію телеметричних даних у глобальну мережу (див. рис. 2.1).

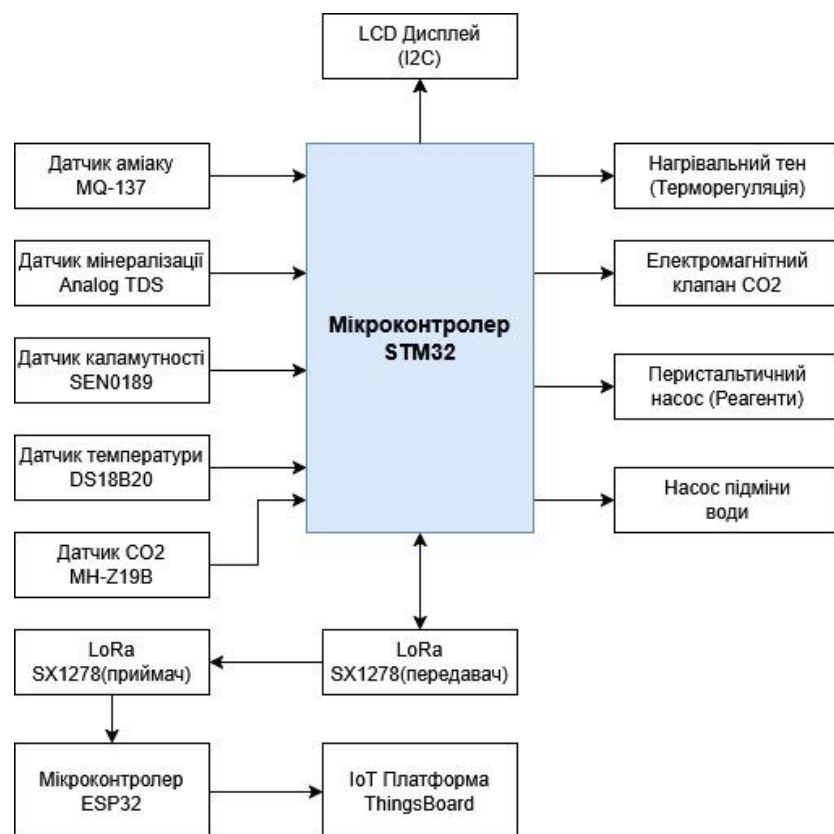


Рис. 2.1. Структурна схема системи

Ключовим елементом, що визначає обчислювальні можливості системи, обрано відлагоджувальну плату Blue Pill на базі 32-бітного мікроконтролера STM32F103C8T6. Вибір архітектури ARM Cortex-M3 обумовлений необхідністю виконання складних математичних, що обчислюються в реальному часі, зокрема розрахунку нелінійних моделей токсичності. Мікроконтролер функціонує на тактовій частоті 72 МГц і оснащений двома незалежними 12-бітними аналого-цифровими перетворювачами, що дозволяє підключати групу аналогових сенсорів безпосередньо до портів введення-виведення, мінімізуючи похибки квантування та спрощуючи схемотехнічне рішення.

Підсистема сенсорів спроектована таким чином, щоб охопити повний спектр критичних параметрів життєзабезпечення. Для контролю температурного режиму застосовано цифровий датчик DS18B20 у герметичному виконанні з нержавіючої сталі. Використання послідовного інтерфейсу 1-Wire забезпечує високу надійність передавання вимірних даних на великі відстані, що є актуальним для великих виробничих приміщень. Моніторинг хімічного складу води покладено на групу аналогових перетворювачів. Для визначення концентрації азотовмісних сполук обрано напівпровідниковий сенсор MQ-137, чутливий елемент якого змінює провідність пропорційно вмісту аміаку. Оцінка загальної мінералізації води та ефективності роботи біофільтра здійснюється датчиком електропровідності Analog TDS Sensor. Оптичний контроль прозорості води реалізовано на базі сенсора SEN0189, що працює за принципом вимірювання розсіювання інфрачервоного випромінювання на зважених частках. Додатково введено контур контролю ефективності дегазації на основі інфрачервоного датчика вуглекислого газу MH-Z19B, який підключається через цифровий інтерфейс UART.

Керування виконавчими механізмами реалізовано через блок електромагнітних реле, що виконує функцію гальванічної розв'язки низьковольтної логіки керування від силових кіл змінного струму. Це дозволяє системі безпечно комутувати потужне навантаження, зокрема електричний нагрівач для термостабілізації, мембранний компресор для аерації та циркуляційні насоси. Для високоточного дозування хімічних реагентів,

необхідних для корекції рівня рН, передбачено керування перистальтичними насосами. Комунікаційна архітектура системи розроблена з урахуванням специфіки промислових об'єктів, де наявність металевих конструкцій перешкоджає поширенню сигналів стандартних бездротових мереж. Для забезпечення надійного каналу телеметрії обрано технологію LoRa, реалізовану на модулі Ra-02 з чіпом SX1278. Роль шлюзу виконує окремий модуль на базі мікроконтролера ESP32, який приймає пакети LoRa та передає їх через мережу Wi-Fi на хмарну платформу. Зведені технічні характеристики обраних засобів вимірювання представлені в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1

Характеристики вимірювальних перетворювачів системи

Параметр вимірювання	Назва	Інтерфейс підключення	Діапазон вимірювання	Особливості
Температура води	DS18B20	1-Wire	-55 ... +125 °C	Точність ± 0.5 °C
Концентрація аміаку	MQ-137	Analog	5 ... 500 ppm	Висока чутливість до NH ₃
Мінералізація	Analog TDS Sensor	Analog	0 ... 1000 ppm	Потребує термокомпенсації
Каламутність води	SEN0189	Analog	0 ... 3000 NTU	Інфрачервоний метод
Рівень CO ₂	MH-Z19B	UART	0 ... 5000 ppm	Автокалібрування нуля

Вибір зазначеної елементної бази дозволяє створити збалансовану систему, яка відповідає метрологічним вимогам процесу вирощування риби та забезпечує необхідну надійність функціонування в умовах підвищеної вологості. Розподіл задач між двома мікроконтролерами дозволяє уникнути конфліктів ресурсів при одночасній обробці критичних алгоритмів керування та підтримці

мережевого з'єднання, що є запорукою стабільної роботи комплексу в автономному режимі.

2.2. Методи організації інформаційного обміну та обробки сигналів у системі

Надійність та ефективність функціонування системи, що автоматизовано керує процесами в аквакультурі визначається комплексом факторів, ключове місце з них, займають достовірність вхідної вимірювальної інформації та стабільність каналів передачі даних [15]. У даному підрозділі розглядаються методики первинної обробки сигналів сенсорів, спрямовані на усунення впливу стохастичних завад, а також проводиться порівняльний аналіз сучасних комунікаційних протоколів для наукового обґрунтування вибору технологічного стеку розроблюваної системи.

Отримання об'єктивних даних про стан водного середовища в реальних умовах експлуатації супроводжується впливом низки дестабілізуючих факторів, обумовлених специфікою промислового об'єкта. До таких факторів належать електромагнітні завади від потужного насосного та компресорного обладнання, температурний дрейф характеристик напівпровідникових елементів та перехресна чутливість електрохімічних сенсорів [16]. Пряме використання необроблених даних з виходу аналого-цифрового перетворювача для формування керуючих впливів є неприпустимим, оскільки наявність випадкових викидів або систематичної похибки може призвести до хибних спрацювань виконавчих механізмів, наприклад, несанкціонованого дозування хімічних реагентів, що несе загрозу для біологічних об'єктів вирощування.

Процес підготовки даних у розробленій системі базується на методі багатоступеневої нормалізації вхідних сигналів. Більшість використаних датчиків, зокрема сенсори якості води та газоаналізатори, формують на виході електричний сигнал напруги, рівень якого залежить від вимірюваного фізичного параметра. Тому першим етапом обробки є перетворення дискретного коду аналого-цифрового перетворювача у значення напруги з урахуванням опорної

напруги мікроконтролера. Наступним етапом є застосування передавальних характеристик сенсорів для конвертації електричної величини у відповідні фізичні одиниці вимірювання. Цей процес передбачає використання апроксимаційних поліномів, отриманих на основі калібрувальних кривих, що дозволяє лінеаризувати показання датчиків у всьому робочому діапазоні та компенсувати нелінійність чутливих елементів.

Окремої уваги заслуговує вибір методу цифрової фільтрації для придушення високочастотного шуму. У ході проєктування розглядався метод простого ковзного середнього, який ефективно згладжує випадкові флуктуації, але потребує зберігання значного масиву попередніх значень, що витрачає оперативну пам'ять мікроконтролера. Альтернативою є медіанна фільтрація, яка добре усуває імпульсні завади, але вимагає значних обчислювальних ресурсів на операцію сортування масиву. Оптимальним рішенням для вбудованих систем реального часу визначено метод експоненційного ковзного середнього. Цей рекурсивний алгоритм не потребує зберігання історії вимірювань і дозволяє регулювати ступінь згладжування за допомогою єдиного вагового коефіцієнта, забезпечуючи компроміс між якістю фільтрації та швидкістю системи.

Важливим елементом запропонованої методики є верифікація даних на належність до допустимого фізичного діапазону [17]. Специфіка біологічного об'єкта накладає чіткі обмеження на можливі значення та швидкість зміни параметрів середовища. Наприклад, температура води у великому резервуарі не може миттєво змінитися на значну величину через високу теплоємність води, а рівень водневого показника не може виходити за межі шкали кислотності. У системі реалізовано алгоритм перевірки фізичної адекватності, який аналізує кожне отримане значення перед його використанням у контурі регулювання. Якщо результат вимірювання виходить за встановлені фізичні межі або характеризується аномально високою швидкістю зміни, система ідентифікує таку ситуацію як апаратну помилку сенсора або порушення цілісності лінії зв'язку. У такому випадку некоректне значення ігнорується, а алгоритм керування переходить у безпечний режим роботи, блокуючи активність відповідних виконавчих механізмів для запобігання аварійним ситуаціям.

Для організації надійного інформаційного обміну між розподіленими сенсорними вузлами та центральним шлюзом було проведено системний аналіз існуючих стандартів бездротової передачі даних, придатних для використання в умовах промислового підприємства. Основними критеріями вибору виступали радіус дії в умовах щільної забудови, енергоспоживання, стійкість до інтерференції та складність розгортання мережевої інфраструктури. Результати порівняльного аналізу ключових характеристик бездротових протоколів наведено у таблиці 2.2.

Таблиця 2.2

Порівняльна характеристика бездротових технологій передачі даних

Характеристика	Wi-Fi (IEEE 802.11)	ZigBee (IEEE 802.15.4)	LoRa (LoRaWAN)
Радіус дії	до 100 м	до 100 м (без ретрансляції)	до 15 км
Проникаюча здатність	Низька (2.4 ГГц)	Середня (2.4 ГГц)	Висока (433/868 МГц)
Енергоспоживання	Високе (> 200 мА)	Середнє (~ 30 мА)	Низьке (~ 10 мА)
Топологія мережі	Зірка (Star)	Комірка	Зірка (Star-of-Stars)
Швидкість передачі	Висока (> 54 Мбіт/с)	Середня (250 кбіт/с)	Низька (0.3-50 кбіт/с)

Широко розповсюджений стандарт Wi-Fi забезпечує швидкість передавання даних, але має суттєві недоліки для задач промислової телеметрії. Високе енергоспоживання радіомодулів унеможливорює тривалу автономну роботу сенсорних вузлів від акумуляторних джерел живлення. Крім того, використання височастотного діапазону 2.4 ГГц призводить до швидкого затухання сигналу при проходженні крізь залізобетонні перекриття та металеві

конструкції ангарів, а наявність великих мас води створює ефект поглинання радіохвиль, що вимагає встановлення великої кількості точок доступу для покриття всієї території господарства.

Технологія ZigBee дає можливість для створення енергоефективних мереж зі складною комірчастою топологією, де кожен вузол може виступати ретранслятором сигналу. Однак надійність такої мережі прямо залежить від стабільності роботи всіх проміжних ланок. У випадку виходу з ладу або знеструмлення критичних вузлів-ретрансляторів можлива втрата зв'язку з віддаленими датчиками. Також налаштування маршрутизації та підтримка цілісності мережі вимагає значних обчислювальних ресурсів мікроконтролера та ускладнює протокол обміну.

Натомість технологія LoRa використовує метод частотної модуляції з розширеним спектром, відомий як Chirp Spread Spectrum (див. рис. 2.2).

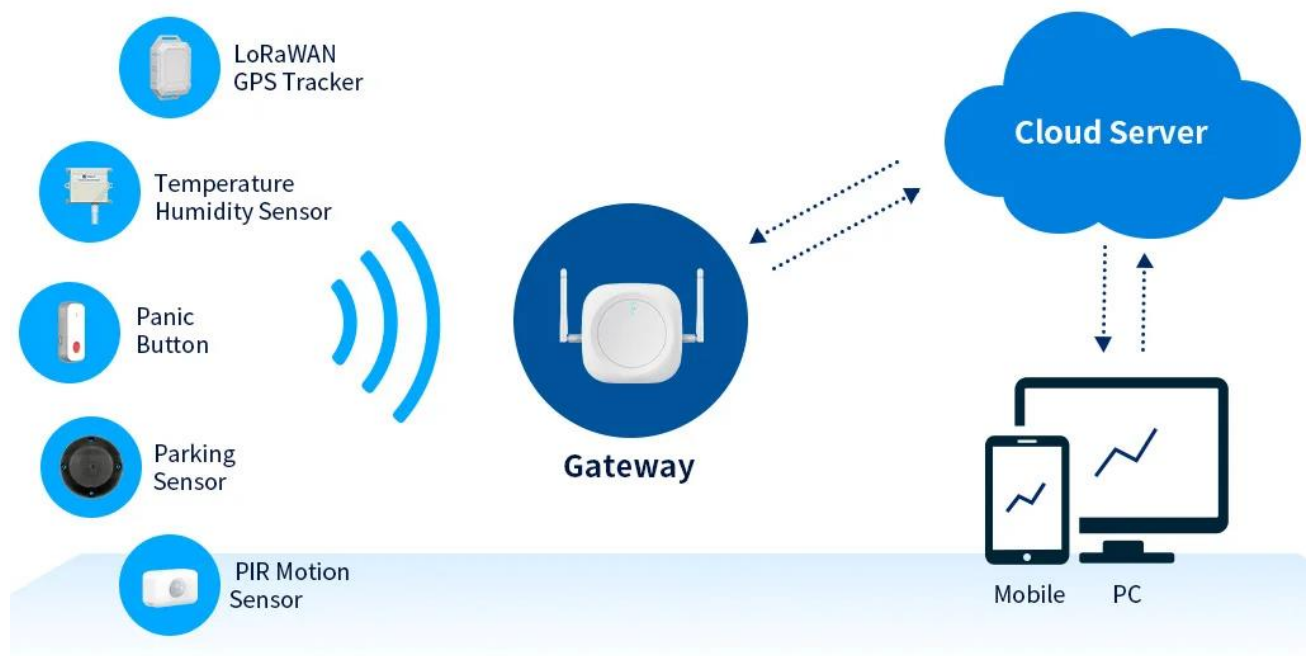


Рис. 2.2. Архітектура мережі передачі даних LoRaWAN

Цей метод забезпечує унікальне поєднання характеристик, недосяжне для вузькосмугових систем. Завдяки високій спектральній щільності сигналу технологія дозволяє перетворювати пакети даних навіть при рівні сигналу нижче рівня шуму, що забезпечує високу завадостійкість. Дальність зв'язку може досягати кількох кілометрів у межах прямої видимості або сотень метрів у складних умовах промислових приміщень без необхідності використання ретрансляторів [18-19].

Низька швидкість передачі даних, характерна для LoRa, не є критичним обмеженням для передачі телеметрії, оскільки параметри водного середовища змінюються відносно повільно. Базуючись на проведеному аналізі, для реалізації фізичного рівня передачі даних у системі обрано технологію LoRa як найбільш адаптовану до умов розподілених об'єктів аквакультури.

Для інтеграції локальної системи керування з хмарною платформою необхідно обрати протокол, що гарантує доставку повідомлень при можливому нестабільному з'єднанні з мережею Інтернет. Традиційний протокол HTTP, який працює за схемою запит-відповідь, створює значний надлишковий трафік через необхідність передачі службових заголовків у кожному пакеті. Крім того, для отримання команд керування від сервера пристрій змушений постійно надсилати запити опитування, що нераціонально витрачає мережевий трафік та обчислювальні ресурси мікроконтролера.

Протокол CoAP, створений спеціально для обмежених пристроїв, функціонує над протоколом UDP. Хоча він є легковаговим, відсутність вбудованих механізмів гарантованої доставки та контролю порядку надходження пакетів може бути критичною для систем керування, де важлива чітка послідовність виконання команд.

Оптимальним рішенням для задач Інтернету речей є протокол MQTT, який функціонує за моделлю публікація-підписка поверх надійного транспортного протоколу TCP/IP (див. рис. 2.3).

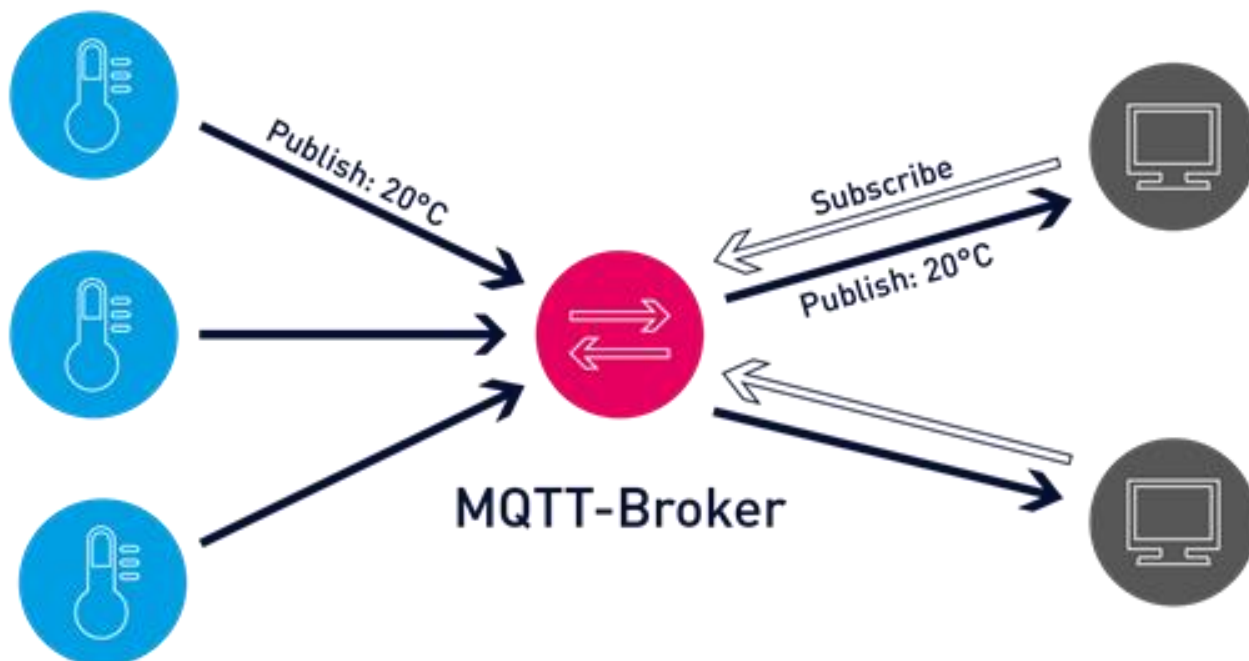


Рис. 2.3. Принцип інформаційного обміну за протоколом MQTT

Він характеризується мінімальним розміром заголовка та підтримує механізми збереження активного з'єднання без постійної передачі даних. Головною перевагою для розроблюваної системи є вбудована підтримка різних рівнів якості обслуговування, відомих як QoS, що дозволяє гарантувати доставку критично важливих повідомлень навіть після відновлення розірваного з'єднання. Завдяки архітектурі підписки пристрій може миттєво отримувати команди керування від сервера без необхідності постійного опитування, що забезпечує мінімальну затримку реакції на дії оператора [20]. Саме сукупність цих характеристик обумовила вибір протоколу MQTT як базового стандарту для організації взаємодії між шлюзом системи та хмарною платформою.

2.3. Математичне моделювання динаміки параметрів водного середовища та розрахунок індексів токсичності

Розробка ефективної системи адаптивного керування для системи вирощування промислових видів риб неможлива без створення адекватного математичного опису процесів, що протікають в об'єкті керування. Водне середовище є складною динамічною системою, стан якої визначається

сукупністю тісно пов'язаних фізичних, хімічних та біологічних факторів, що мають стохастичний характер зміни. Складність керування таким об'єктом полягає у тому, що зміна одного параметра неминуче призводить до каскадної зміни інших характеристик системи, що вимагає переходу від емпіричного керування до методів, що базуються на детермінованих залежностях.

Для реалізації алгоритмів керування на рівні обчислювального ядра мікроконтролера необхідно формалізувати ці процеси в систему математичних моделей. Саме математична абстракція дозволяє трансформувати неперервні природні процеси у дискретні алгоритми, придатні для виконання цифровим процесором. Наявність точної моделі дозволяє системі не лише реагувати на поточні відхилення, а й прогнозувати поведінку об'єкта у найближчому майбутньому, здійснюючи випереджувальне керування. У даному підрозділі розглядаються аналітичні моделі теплового балансу, кінетики хімічної рівноваги токсичних сполук та методи цифрової фільтрації сигналів, які в сукупності складають математичне ядро розроблюваної системи.

Першочерговим завданням є математичний опис теплових процесів, оскільки температура води є інтегральним параметром, що визначає інтенсивність усіх життєвих процесів в аквакультурі. Вона безпосередньо впливає на швидкість метаболізму гідробіонтів, ефективність засвоєння кормів, розчинність кисню та ферментативну активність бактерій у біофільтрі. З точки зору теорії автоматичного керування, водне середовище в резервуарі характеризується значною питомою теплоємністю, що обумовлює високу інерційність каналу терморегуляції. Це проявляється у наявності суттєвого транспортного запізнення, реакція температури на увімкнення нагрівального елемента відбувається не миттєво, а процес охолодження або нагріву триває досить довго навіть після зняття керуючого впливу, що створює ризик повторного регулювання та вимагає врахування динамічних характеристик об'єкта.

Для аналітичного опису динаміки зміни температури води використовується диференціальне рівняння теплового балансу (2.1), що описується на базі закону збереження енергії. Ця модель розглядає резервуар як

об'єкт із зосередженими параметрами та враховує алгебраїчну суму потоків енергії, а саме надходження теплової енергії від електричного нагрівача, процес акумуляції тепла водною масою та неминучі втрати тепла в навколишнє середовище через теплопровідність стінок резервуара та теплообмін з поверхні випаровування:

$$C_v \cdot V \cdot \frac{dT(t)}{dt} = P(t) \cdot \eta - k_{loss} \cdot S \cdot (T(t) - T_{amb}), \quad (2.1)$$

де C_v - питома об'ємна теплоємність води, яка є фізичною константою;

V - повний об'єм води в системі циркуляції;

$T(t)$ - миттєве значення температури води;

$P(t)$ - електрична потужність нагрівального елемента;

η - коефіцієнт ККД, що враховує втрати на нагрів конструктивних елементів;

k_{loss} - узагальнений коефіцієнт тепловтрат, що залежить від матеріалу стінок та інтенсивності випаровування з поверхні;

S - ефективна площа поверхні теплообміну;

T_{amb} - температура повітря у приміщенні.

Це рівняння показує, що швидкість зміни температури прямо пропорційна різниці між підведеною та втраченою енергією і обернено пропорційна масі води в системі. Ця модель використовується в алгоритмі керування для розрахунку необхідної тривалості роботи нагрівача.

Критично важливим аспектом для забезпечення життєдіяльності риб є контроль концентрації токсичних продуктів метаболізму, насамперед аміаку. Складність автоматизації цього процесу полягає у тому, що датчики вимірюють концентрацію загального аміачного азоту, відомого як TAN, який є сумою двох форм, а саме, іонізованого амонію NH_4^+ та неіонізованого аміаку NH_3 .

Біологічну небезпеку становить саме неіонізована форма, що може проникати через клітинні мембрани. Співвідношення між цими формами не є постійним, а залежить від термодинамічної рівноваги, яка зсувається при зміні

температури та рівня рН. Тому для прийняття рішень системою керування необхідно розраховувати саме концентрацію токсичного компонента [21]. Для цього в роботі використано модель Емерсона (2.2). Спочатку обчислюється константа дисоціації кислоти pK_a , яка залежить від температури середовища T , виміряної у градусах Цельсія:

$$pK_a = 0.09018 + \frac{2729.92}{T+273.15}, \quad (2.2)$$

Отримане значення константи дисоціації виступає базовим параметром для визначення частки токсичного неіонізованого аміаку у водному розчині з обов'язковим урахуванням поточного водневого показника рН. Цей етап є критично важливим, оскільки хімічна рівновага між безпечним амонієм та токсичним аміаком є вкрай чутливою до кислотності середовища. Формула для розрахунку концентрації токсичної форми NH_3 (2.3), яка інтегрована в програмне забезпечення мікроконтролера, має вигляд:

$$NH_3 = \text{fracTAN} \cdot 1 + 10^{pK_a - pH}, \quad (2.3)$$

де TAN - виміряна концентрація загального аміаку.

Детальний аналіз наведеної функціональної залежності демонструє нелінійний характер впливу фізико-хімічних параметрів на токсичність середовища. Зокрема, при підвищенні температури води та, що більш важливо, при зростанні рівня рН, знаменник дробу у формулі стрімко зменшується. Це призводить до різкого, часто експоненційного, зростання концентрації токсичного аміаку навіть якщо, загальний рівень забруднення азотом залишається незмінним. Наприклад, зміщення рН лише на одну одиницю в лужний бік може збільшити токсичність у десять разів. Впровадження цієї математичної моделі безпосередньо у програмний код керуючого мікроконтролера дозволяє реалізувати адаптивний алгоритм безпеки. Система не просто порівнює покази датчиків з константами, а динамічно змінює поріг

спрацювання аварійної підсистеми очищення залежно від поточних умов середовища, забезпечуючи випереджувальну реакцію на потенційну загрозу замору риби.

Окрім розрахунку хімічних рівноваг, обов'язковій математичній обробці та нормалізації підлягають дані з кондуктометричного датчика мінералізації, відомого як TDS-метр (2.4). Це зумовлено фізичною природою процесу електропровідності води, яка суттєво залежить від температури. При нагріванні в'язкість води зменшується, а рухливість іонів зростає, що призводить до завищення показів приладу. Для отримання коректних та співставних даних необхідно привести виміряне значення електропровідності до стандартної температури, яка у міжнародній практиці прийнята рівною 25 °C. Для реалізації цієї процедури в алгоритмі використовується формула лінійної температурної компенсації:

$$EC_{25} = \frac{EC_t}{1 + \beta \cdot (T - 25)}, \quad (2.4)$$

де EC_{25} - скориговане значення електропровідності;

EC_t - поточне виміряне значення;

T - поточна температура води;

β - температурний коефіцієнт, зазвичай приймається рівним 0.02.

Використання цього алгоритму компенсації дозволяє повністю виключити температурну похибку вимірювання солоності, яка могла б бути викликана добовими коливаннями температури води в резервуарі. Без такої корекції система могла б помилково ідентифікувати нагрів води вдень як зростання забруднення, або, навпаки, занижувати реальний рівень мінералізації вночі при охолодженні води. Таким чином, розроблений математичний апарат, що включає диференціальні моделі теплового балансу, рівняння кінетики хімічної рівноваги аміаку та методи цифрової обробки сигналів, створює надійну теоретичну основу для побудови адаптивної системи керування. Така система здатна забезпечити високу стабільність параметрів водного середовища та біологічну

безпеку об'єкта в умовах невизначеності, змінного навантаження та зовнішніх збурень, мінімізуючи вплив людського фактору на технологічний процес.

2.4. Алгоритми адаптивного керування виконавчими механізмами

Розробка алгоритмічного забезпечення мікроконтролера є завершальним і найбільш відповідальним етапом теоретичного проектування системи. Вона поєднує в собі апаратні можливості обраної обчислювальної платформи STM32 та розроблені раніше математичні моделі динаміки водного середовища. Синтез алгоритмів керування спрямований на створення детермінованої логіки прийняття рішень, яка дозволяє автоматично підтримувати вектор життєво важливих параметрів води, температуру, рН, рівень кисню та токсинів, у заданій області допустимих значень. При цьому цільовою функцією синтезу є не лише точність регулювання, але й мінімізація участі людини-оператора та оптимізація витрат енергоресурсів на роботу виконавчого обладнання.

Враховуючи специфіку об'єкта керування - резервуара з водою, який характеризується значною тепловою та хімічною інерційністю, а також складною взаємозалежністю параметрів, використання класичних лінійних регуляторів не завжди є доцільним через складність їх налаштування та надмірну чутливість до збурень. Тому в роботі запропоновано використання комбінованого підходу, позиційного закону регулювання з гістерезисом для термостабілізації та адаптивного порогового керування для контролю хімічного складу води, де значення змінюються динамічно в залежності від стану системи [22].

Фундаментальною задачею системи є підтримання температурного режиму, оскільки температура виступає каталізатором усіх біологічних та хімічних процесів в аквакультурі, впливаючи на метаболізм риб та активність бактерій у біофільтрі. Для керування нагрівальним елементом обрано двопозиційний закон регулювання. Вибір цього методу обумовлений фізичною природою виконавчого механізму - електромагнітного реле, яке є дискретним елементом і може перебувати лише у двох станах, увімкнено або вимкнено.

Однак пряме використання простого порогового порівняння є неприпустимим у реальних цифрових системах. Наявність високочастотних шумів у вимірювальному тракті та незначні теплові флуктуації на межі спрацювання призвели б до явища брязкоту контактів реле. Це означає багаторазове, хаотичне перемикання силового елемента протягом короткого проміжку часу, що неминуче викликає прискорений механічний знос комутаційного обладнання, перегрів контактної групи та генерацію потужних імпульсних завад у мережі живлення, які можуть порушити роботу мікроконтролера.

Для вирішення цієї проблеми алгоритм терморегуляції (2.5) реалізує логіку з введенням зони нечутливості, або петлі гістерезису. Сутність методу полягає у рознесенні точок увімкнення та вимикання нагрівача на величину дельти. Таким чином, система має дві межі перемикання, нижню, при перетині якої нагрівач вмикається, та верхню, при досягненні якої відбувається вимкнення. Це дозволяє системі ігнорувати незначні коливання температури всередині цього коридору і забезпечує стабільний, передбачуваний цикл роботи обладнання, використовуючи природну теплову інерцію води як фільтр низьких частот.

Математично закон керування станом нагрівача описується системою логічних умов:

$$S_{heater}(t) = \begin{cases} (1, & \text{якщо } T(t) \leq T_{set} - \Delta T) \\ 0, & \text{якщо } T(t) \geq T_{set} + \Delta T, \\ S_{heater}(t-1), & \text{інакше} \end{cases} \quad (2.5)$$

де $T(t)$ - поточне виміряне та відфільтроване значення температури;

T_{set} - задане значення температури;

ΔT - половина ширини петлі гістерезису;

$S_{heater}(t-1)$ - попередній стан нагрівача.

Така логіка забезпечує енергетичну ефективність, оскільки нагрівач працює довгими циклами, використовуючи теплову інерцію води як природний демпфер.

Найбільш інноваційною частиною розробленого програмного забезпечення є алгоритм керування системою очищення та заміни води, який реалізує принцип адаптивності. У традиційних системах автоматизації поріг спрацювання аварійної системи за рівнем аміаку є фіксованою константою [23]. Проте, як було показано у попередніх підрозділах, токсичність аміаку критично залежить від температури та рівня рН. Фіксований поріг не гарантує безпеки, при підвищенні температури води безпечна концентрація загального азоту різко знижується, і система зі статичним значенням може не зреагувати на загрозу отруєння риби. Розроблений адаптивний алгоритм здійснює динамічний перерахунок допустимої концентрації забруднення у кожному циклі вимірювань. Мікроконтролер використовує поточні значення температури та водневого показника для розрахунку частки неіонізованого аміаку за моделлю Емерсона (2.6).

Керуючий сигнал для насоса заміни води формується не на основі сирих показань датчика, а на основі розрахованого індексу токсичності:

$$S_{pump}(t) = \begin{cases} 1, & \text{якщо } \frac{TAN(t)}{1+10^{(pK_a(T)-pH(t))}} > NH_{3max}, \\ 0, & \text{інакше} \end{cases} \quad (2.6)$$

де $TAN(t)$ - поточна виміряна концентрація загального аміачного азоту;

$pK_a(T)$ - константа дисоціації, що залежить від поточної температури;

NH_{3max} - гранично допустима концентрація токсичного неіонізованого аміаку.

Використання запропонованого підходу надає системі здатності не просто реагувати на перетин порогових значень, а гнучко адаптуватися до динамічних змін фізико-хімічних параметрів навколишнього середовища, імітуючи природні механізми саморегуляції. Зокрема, при підвищенні температури води, коли, згідно з моделлю Емерсона, частка токсичного неіонізованого аміаку зростає за експоненціальним законом, а інтенсивність метаболізму риб досягає піку, система автоматично підвищує свою чутливість. Це призводить до більш раннього

ввімкнення підсистеми очищення та заміни води, що дозволяє гарантовано упередити досягнення летальних концентрацій токсинів та запобігти замору риби. Натомість, у періоди низьких температур, коли біологічна активність знижується, а токсичність аміаку є мінімальною, алгоритм дозволяє утримувати вищий рівень загального азоту без ризику для гідробіонтів. Така стратегія забезпечує суттєву економію ресурсу насосного обладнання та зменшує обсяги споживання свіжої води, що позитивно впливає на загальну економічну ефективність господарства.

Паралельно з контурами терморегуляції та хімічного очищення у безперервному режимі функціонує алгоритм керування аерацією (2.7). Оскільки концентрація розчиненого кисню є критичним лімітуючим фактором життєзабезпечення, керування роботою повітряного компресора має безумовний пріоритет над іншими виконавчими механізмами. Розроблений алгоритм передбачає функціонування у двох основних режимах: штатному та аварійному. Штатний режим забезпечує циклічну аерацію за таймером, що є необхідним для підтримки життєдіяльності аеробних бактерій біофільтра навіть за відсутності критичного зниження кисню. Аварійний режим активується не лише як реакція на падіння рівня кисню, але й превентивно - при фіксації зростання розрахункового рівня аміаку. Це зумовлено тим, що процес нітрифікації є біохімічним окисленням, яке потребує значних обсягів кисню для перетворення токсичного аміаку в безпечні нітрати [24]. Тому логіка роботи компресора описується диз'юнктивною функцією, яка враховує стан насоса заміни води, забезпечуючи посилену подачу кисню під час пікових навантажень на систему очищення:

$$S_{air}(t) = S_{pump}(t) \vee S_{timer}(t), \quad (2.7)$$

де $S_{pump}(t)$ - стан насоса заміни;

$S_{timer}(t)$ - сигнал таймера для штатної профілактичної аерації.

Така логіка гарантує, що при будь-якому підвищенні навантаження на систему фільтрації аератор буде активовано примусово.

Невід'ємною складовою алгоритмічного забезпечення, що гарантує надійність експлуатації комплексу в автономному режимі, є підсистема діагностики помилок та захисту від аварійних ситуацій. Враховуючи, що система працює без постійного нагляду оператора, вона повинна володіти здатністю автоматично верифікувати вхідні дані та розрізняти істинні зміни параметрів середовища від хибних показань, викликаних несправністю сенсорів або обривом ліній зв'язку. Для реалізації цієї функції введено процедуру перевірки вимірних значень на належність до допустимого фізичного діапазону. У випадку, якщо отримане значення виходить за межі встановленого коридору, наприклад, фіксується нереалістично високий рівень рН або від'ємна температура, система класифікує цю подію як апаратну аварію сенсора. Як наслідок, активується захисний протокол, мікроконтролер блокує роботу залежних виконавчих механізмів, щоб уникнути небезпечних дій, наприклад, передозування реагентів, і негайно формує пакет з кодом помилки для передачі через радіоканал LoRa на диспетчерський пункт. Таким чином, синтезовані алгоритми забезпечують еволюційний перехід від найпростіших порогових регуляторів до інтелектуального адаптивного керування, де кожне рішення приймається на основі глибокого комплексного аналізу стану водного середовища та взаємозв'язків між його параметрами.

РОЗДІЛ 3

ПРОЄКТУВАННЯ ТА РЕАЛІЗАЦІЯ АПАРАТНО-ПРОГРАМНОГО
ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СИСТЕМИ

3.1. Розробка програмного забезпечення керуючого мікроконтролера

3.1.1. Середовище розробки та конфігурація периферії. Програмне забезпечення керуючого мікроконтролера STM32F103C8T6 розроблено мовою програмування C у інтегрованому середовищі STM32CubeIDE (див. рис. 3.1). Вибір цього інструментарію обумовлений наявністю вбудованого конфігуратора периферії STM32CubeMX, який дозволяє в графічному режимі налаштувати тактування, розпіновку та параметри інтерфейсів, автоматично генеруючи ініціалізаційний код на основі бібліотек рівня апаратних абстракцій, відомих як HAL. Це значно прискорює процес розробки та мінімізує помилки на етапі налаштування апаратної частини. На етапі конфігурації було активовано систему тактування від зовнішнього кварцового резонатора частотою 8 МГц з множенням на PLL до робочої частоти ядра 72 МГц..

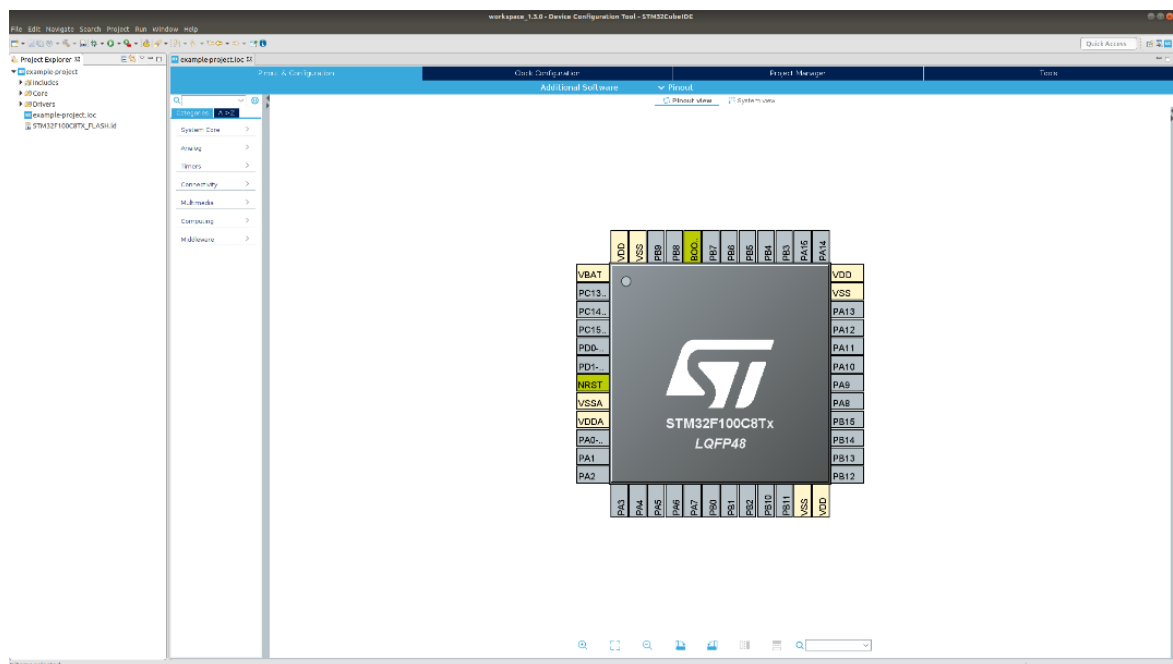


Рис. 3.1. Інтерфейс конфігурації мікроконтролера в STM32CubeIDE

Для роботи з аналоговими сенсорами налаштовано модуль АЦП першого каналу в режимі циклічного сканування каналів що використовують контролер прямого доступу до пам'яті, або DMA.

3.1.2. Програмна реалізація моніторингу. Архітектура програмного забезпечення базується на використанні структур даних для зберігання стану системи (див.рис 3.2).

```
typedef struct {
    float temperature;           // Температура, °C
    float ammonia_total;         // Загальний аміак (TAN), мг/л
    float ammonia_toxic;         // Токсичний аміак (NH3), мг/л
    uint16_t tds_value;          // Мінералізація, ppm
    uint16_t co2_ppm;            // Рівень CO2, ppm
    uint8_t relay_flags;         // Бітова маска стану реле
} SystemState_t;

volatile uint16_t adc_buffer[3]; // Буфер DMA: [0]-NH3, [1]-
TDS, [2]-Turbidity
SystemState_t current_state;

void Sensors_ProcessData(void) {
    float raw_nh3 = Filter_EMA(adc_buffer[0]);
    current_state.ammonia_total = Convert_VoltsToPPM(raw_nh3);
    current_state.temperature = DS18B20_ReadTemp();
    float raw_tds = Filter_EMA(adc_buffer[1]);
    current_state.tds_value      =      TDS_Compensate(raw_tds,
current_state.temperature);
    current_state.ammonia_toxic = Calculate_ToxicNH3(
        current_state.ammonia_total,
        current_state.temperature,
        pH (або з датчика)
    );
}
```

Рис. 3.2. Лістинг програмного коду що описує структуру даних та функцію опитування сенсорів

Усі виміряні параметри агрегуються в єдину структуру `SystemState_t`, що спрощує передачу даних між функціями обробки та модулем зв'язку. Зчитування аналогових датчиків, таких як MQ-137, TDS та SEN0189, відбувається через буфер DMA. Для усунення шумів реалізовано програмний фільтр, описаний у другому розділі. Цифровий датчик температури DS18B20 опитується через програмну реалізацію протоколу 1-Wire із дотриманням жорстких часових інтервалів. Фрагмент коду, що відповідає за структуру даних та функцію опитування сенсорів

3.1.3. Реалізація алгоритмів адаптивного регулювання. Програмна реалізація алгоритмів автоматичного керування становить основу бізнес-логіки мікроконтролера, трансформуючи теоретичні закони регулювання, обґрунтовані у другому розділі, у послідовність виконуваних інструкцій. Модуль керування виконавчими механізмами функціонує як детермінований скінченний автомат, який у кожній ітерації головного циклу аналізує структуру попередньо оброблених та верифікованих даних `SystemState` і на основі цього аналізу формує дискретні керуючі сигнали для блоку релейної комутації.

Фундаментальним елементом системи є підсистема термостабілізації. Для керування електричним нагрівачем програмно реалізовано двопозиційний закон регулювання з петлею гістерезису. Такий підхід дозволяє уникнути нестабільної роботи виконавчого механізму в точці перемикання, відомої як «брязкіт контактів». Алгоритм порівнює поточну температуру не з одним пороговим значенням, а з температурним коридором: нагрівач вмикається лише тоді, коли температура опускається нижче нижньої межі, і вимикається при досягненні верхньої межі. Це забезпечує необхідну паузу між циклами вмикання, подовжуючи термін служби електромеханічних реле та знижуючи рівень електромагнітних завад у мережі живлення.

Керування гідрохімічним режимом реалізовано на принципах адаптивності. Для керування насосом заміни води система використовує не «сирі» показання датчика, а розраховане за моделлю Емерсона значення концентрації токсичного неіонізованого аміаку. Програма безперервно порівнює

цей розрахунковий індекс із гранично допустимою концентрацією. Реалізація описаних алгоритмів мовою програмування С у головному циклі програми представлена на рис. 3.3.

```
#define TEMP_SETPOINT 22.0f
#define TEMP_HYSTERESIS 0.5f
#define MAX_TOXIC_NH3 0.05f
#define MAX_CO2_LEVEL 1000
#define MIN_PH_LEVEL 6.5
void Control_Loop(void) {
    if (current_state.temperature <= (TEMP_SETPOINT -
TEMP_HYSTERESIS)) {
        Relay_SetState(RELAY_HEATER, 1);
    } else if (current_state.temperature >= (TEMP_SETPOINT +
TEMP_HYSTERESIS)) {
        Relay_SetState(RELAY_HEATER, 0);
    }
    if (current_state.ammonia_toxic > MAX_TOXIC_NH3) {
        Relay_SetState(RELAY_PUMP_CHANGE, 1);
    } else {
        Relay_SetState(RELAY_PUMP_CHANGE, 0);
    }
    if (current_state.ph_level < MIN_PH_LEVEL) {
        Relay_SetState(RELAY_PUMP_DOSE, 1);
    } else {
        Relay_SetState(RELAY_PUMP_DOSE, 0);
    }
    if (current_state.co2_ppm > MAX_CO2_LEVEL) {
        Relay_SetState(RELAY_VALVE_CO2, 1);
    } else {
        Relay_SetState(RELAY_VALVE_CO2, 0);
    }
}
```

Рис. 3.3. Лістинг програмного коду що реалізує функцію керування виконавчими механізмами

Окрім контролю температури та азотних сполук, програмний алгоритм включає незалежні контури регулювання рівня рН і рівня вуглекислого газу. Стабілізація кислотно-лужного балансу є критично важливою, оскільки зміна рН впливає на токсичність аміаку. Для корекції цього параметра використовується перистальтичний насос, який дозволяє здійснювати високоточне дозування рідких реагентів. Якщо виміряне значення рН виходить за межі оптимального діапазону, наприклад, падає нижче 6.5, мікроконтролер активує насос для подачі буферного розчину.

Паралельно здійснюється моніторинг ефективності дегазації на основі даних інфрачервоного датчика МН-Z19В. При перевищенні допустимого рівня вуглекислого газу у повітрі система відкриває електромагнітний клапан або вмикає додаткову витяжну вентиляцію. Така комплексна логіка дозволяє підтримувати параметри середовища у стані динамічної рівноваги

Наведений фрагмент програмного коду демонструє практичну реалізацію логіки керування з використанням умовних операторів if-else, що забезпечує чітку пріоритетність виконання команд. Для підвищення читабельності коду та спрощення процесу налаштування системи ключові параметри, такі як значення температури, величина гістерезису та граничні концентрації речовин, винесено у блок препроцесорних директив #define. Це дозволяє адаптувати систему під різні види гідробіонтів без необхідності втручання в основну логіку алгоритму. Безпосередня взаємодія з апаратними портами інкапсульована у функції Relay_SetState, що відповідає принципам модульного програмування та полегшує перенесення коду на інші апаратні платформи.

3.1.4. Організація передачі даних через LoRa. Для інтеграції з хмарним сервісом мікроконтролер STM32 виконує роль джерела даних. Дані передаються на шлюз через радіоканал LoRa. Взаємодія з модулем SX1278 здійснюється по інтерфейсу SPI. Програмний драйвер LoRa формує пакет даних, що складається саме ідентифікатора пристрою, корисного навантаження та контрольної суми. Функція формування та відправки телеметрії наведена на рис. 3.4.

```

typedef struct __attribute__((packed)) {
    uint8_t device_id;
    int16_t temp_x100;        // Температура * 100 (напр. 2450
// замість 24.50)
    uint16_t nh3_x1000;      // Аміак * 1000
    uint16_t tds;
    uint8_t relays;
} LoRa_Packet_t;

void LoRa_SendTelemetry(void) {
    LoRa_Packet_t packet;

    packet.device_id = 0x01; // ID цього вузла
    packet.temp_x100 = (int16_t)(current_state.temperature *
// 100);
    packet.nh3_x1000 = (uint16_t)(current_state.ammonia_toxic
// * 1000);
    packet.tds = current_state.tds_value;
    packet.relays = current_state.relay_flags;
    SX1278_BeginPacket();
    SX1278_Write(&packet, sizeof(packet));
    SX1278_EndPacket();
}

```

Рис. 3.4. Лістинг програмного коду що відповідає за формування та відправку пакету LoRa

Використання бінарного формату дозволяє передати весь стан системи всього за 8 байт, що значно економить енергію та підвищує дальність зв'язку порівняно з текстовими протоколами. Подальше розпакування та перетворення у JSON для хмари відбувається на стороні шлюзу.

3.1.5. Розробка узагальненого алгоритму функціонування системи. Для забезпечення узгодженої взаємодії всіх програмних модулів та стабільності виконання технологічних процесів розроблено узагальнений алгоритм

функціонування керуючого мікроконтролера. Програмна реалізація алгоритму базується на архітектурі нескінченного циклу, що є стандартом для вбудованих систем керування в реальному часі. Робота пристрою розпочинається з етапу ініціалізації, який виконується одноразово після подачі живлення або апаратного скидання. На цьому етапі відбувається налаштування бібліотек апаратних абстракцій, конфігурація системи тактування для виходу на робочу частоту та запуск периферійних модулів, зокрема аналого-цифрового перетворювача у режимі прямого доступу до пам'яті.

У межах основного циклу виконання програми мікроконтролер першочергово виконує збір вимірювальної інформації, що включає опитування цифрових інтерфейсів та обробку буфера АЦП. Отримані сирі дані підлягають цифровій обробці із застосуванням фільтра експоненційного ковзного середнього для усунення шумів та температурної компенсації показників. На основі даних здійснюється розрахунок індексу токсичності аміаку з використанням математичної моделі Емерсона, що дає можливість оцінити стан водного середовища.

Базуючись на розрахованих параметрах, система переходить до блоку керування, де відбувається перевірка умов для всіх чотирьох підсистем, а саме терморегуляції за допомогою нагрівального тена, очищення води через насос заміни, корекції рН за допомогою перистальтичного насоса та дегазації через клапан вуглекислого газу. Поточні значення порівнюються із заданими значеннями з урахуванням гістерезису, після чого формуються відповідні керуючі сигнали для блоку реле. Далі формується бінарний пакет даних та йде його передача через радіомодуль LoRa на шлюз, після чого алгоритм повертається до початку циклу збору даних. Блок-схема алгоритму наведена на рис. 3.5.

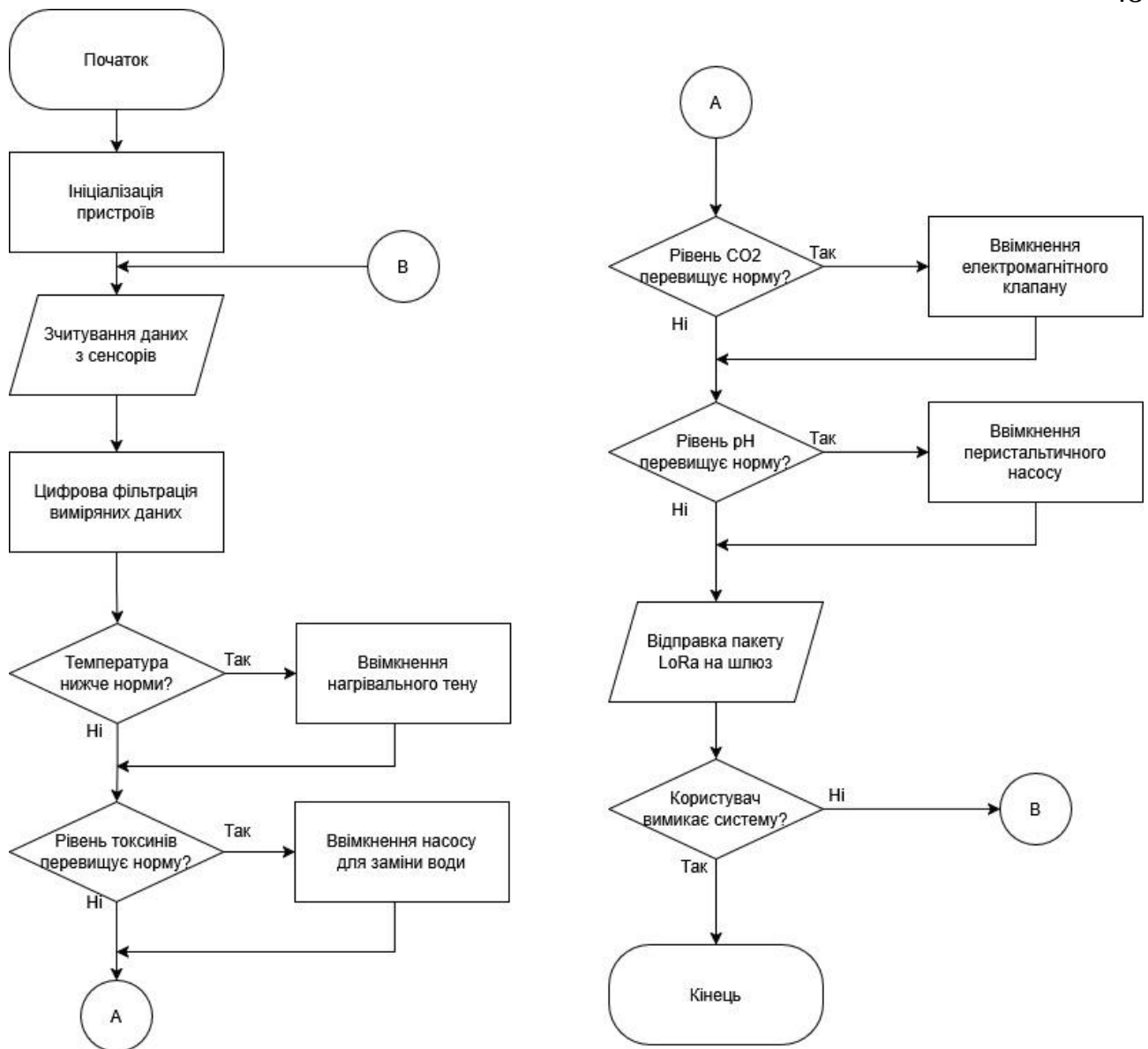


Рис. 3.5. Блок-схема алгоритму роботи пристрою

Блок-схема алгоритму роботи, базується на циклічному опитуванні та послідовній обробці даних, забезпечує високу детермінованість керування, мінімізуючи часову затримку між вимірюванням параметрів та реакцією виконавчих механізмів.

3.2. Розробка архітектури шлюзу IoT та інтеграція з хмарною платформою

Забезпечення глобальної доступності телеметричних даних та можливості віддаленого диспетчерського керування реалізовано шляхом введення в архітектуру системи проміжної ланки, а саме шлюзу Інтернету речей. Головним

завданням цього вузла є трансляція пакетів даних між енергоефективною локальною мережею LoRa, що функціонує в неліцензованому діапазоні частот 433 МГц, та глобальною мережею Інтернет за допомогою стеку протоколів TCP/IP.

Апаратну основу шлюзу складає система на кристалі ESP32, яка поєднує в собі двоядерний мікропроцесор Xtensa LX6, радіомодулі Wi-Fi та Bluetooth. Вибір даної платформи обумовлений наявністю двох незалежних ядер, що дозволяє розпаралелити критичні процеси, перше ядро відповідає за підтримку стабільного з'єднання з точкою доступу Wi-Fi та обмін даними з сервером, тоді як друге ядро забезпечує безперервне опитування радіомодуля LoRa та обробку вхідних радіопакетів у реальному часі.

Алгоритм роботи шлюзу побудовано за принципом подій. При отриманні радіопакета від сенсорного вузла мікроконтролер виконує перевірку цілісності даних шляхом розрахунку контрольної суми, відомої як CRC. У разі успішної верифікації бінарні дані, а саме значення температури, концентрації аміаку та статус реле, та перетворюються у формат JSON. Створений об'єкт містить пари ключ-значення, що є стандартом для обміну даними у веб-системах. Далі шлюз ініціює передачу цього повідомлення на хмарний сервер за протоколом MQTT. Структура пакету наведена на рис. 3.6.

```
{  
  "temperature": 24.50,  
  "ammonia": 0.005,  
  "tds_value": 350,  
  "ph_level": 7.2,  
  "turbidity": 15,  
  "relay_status": true,  
  "error_code": 0  
}
```

Рис. 3.6. Структура JSON-повідомлення

У якості хмарної платформи для збору, зберігання та візуалізації даних обрано систему ThingsBoard. Вона виступає у ролі MQTT-брокера, який приймає повідомлення від шлюзу у визначений топик телеметрії. На стороні сервера налаштовано профілі пристроїв та ланцюжки обробки правил, які автоматично аналізують вхідні дані. Зокрема, реалізовано логіку виявлення аварійних ситуацій, якщо отримане значення рівня аміаку перевищує критичну межу, сервер створює подію тривоги та надсилає сповіщення оператору через інтегровані канали зв'язку.

Для візуалізації стану технологічного процесу у середовищі ThingsBoard розроблено інтерактивну інформаційну панель, або дашборд. Інтерфейс включає віджети для відображення миттєвих значень параметрів у вигляді цифрових індикаторів та стрілочних приладів, а також графіки часових рядів, що дозволяють аналізувати динаміку зміни температури та хімічного складу води за обраний період, наприклад добу, тиждень або місяць. Це надає можливість технологам оцінювати ефективність роботи біофільтра та прогнозувати необхідність обслуговування системи. Інтерфейс оператора зображено на рис. 3.7.

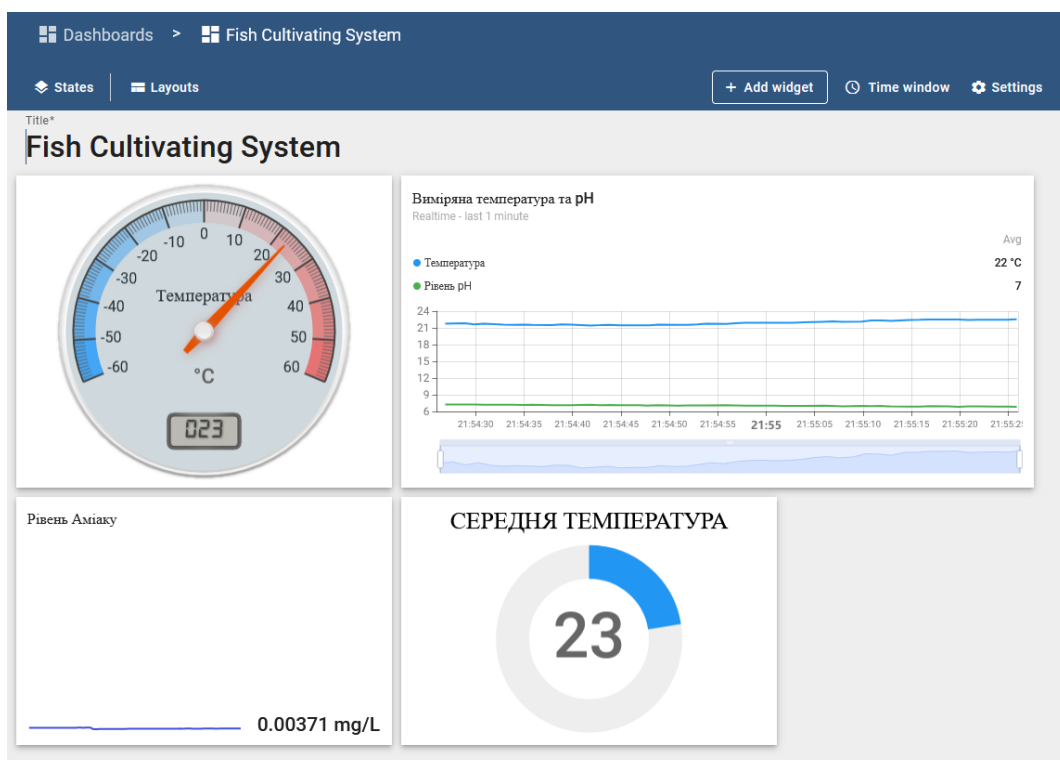


Рис. 3.7. Вигляд інтерфейсу інформаційної панелі ThingsBoard

Для реалізації бізнес-логіки обробки вхідних даних використано інструментарій Рушія правил, або Rule Engine. Спроектовано ланцюжок обробки, який виконує перевірку JSON-паketу на наявність обов'язкових ключів, запис отриманих значень у базу даних часових рядів та аналіз критичних станів. Блок фільтрації скриптів перевіряє умову перевищення порогового рівня аміаку, і у разі виконання умови спрацьовує вузол генерації тривоги.

3.3. Експериментальні дослідження та верифікація розробленої системи

3.3.1. Імітаційне моделювання алгоритму розрахунку токсичності. Для верифікації запропонованого у другому розділі адаптивного алгоритму контролю якості води було проведено чисельне моделювання залежності концентрації токсичного неіонізованого аміаку NH_3 від фізико-хімічних параметрів середовища [25].

Метою моделювання було підтвердження гіпотези про нелінійний характер цієї залежності та демонстрація неефективності використання статичних порогових значень у системах автоматизації. Моделювання виконувалося у пакеті прикладних програм MATLAB. Вхідними змінними виступали температура води в діапазоні варіації $10\ldots 30^\circ\text{C}$ та водневий показник рН в діапазоні $6.5\ldots 8.5$. Концентрація загального аміачного азоту, відомого як TAN, у симуляції приймалася умовно постійною на рівні 1.0 мг/л . Розрахунок частки токсичного аміаку здійснювався на основі моделі Емерсона. Результати моделювання представлено у вигляді тривимірної поверхні відгуку на рис. 3.8.

Аналіз отриманих графічних залежностей свідчить про те, що при низьких температурах, тобто $10\ldots 15^\circ\text{C}$, та нейтральному рН частка токсичного аміаку є мінімальною і не перевищує 0.005 мг/л . Однак при підвищенні температури до 25°C та зміщенні рН у лужний бік до значення 8.0 , концентрація токсичної речовини зростає експоненційно, досягаючи критичних для риби значень понад 0.05 мг/л при тій самій кількості загального азоту.

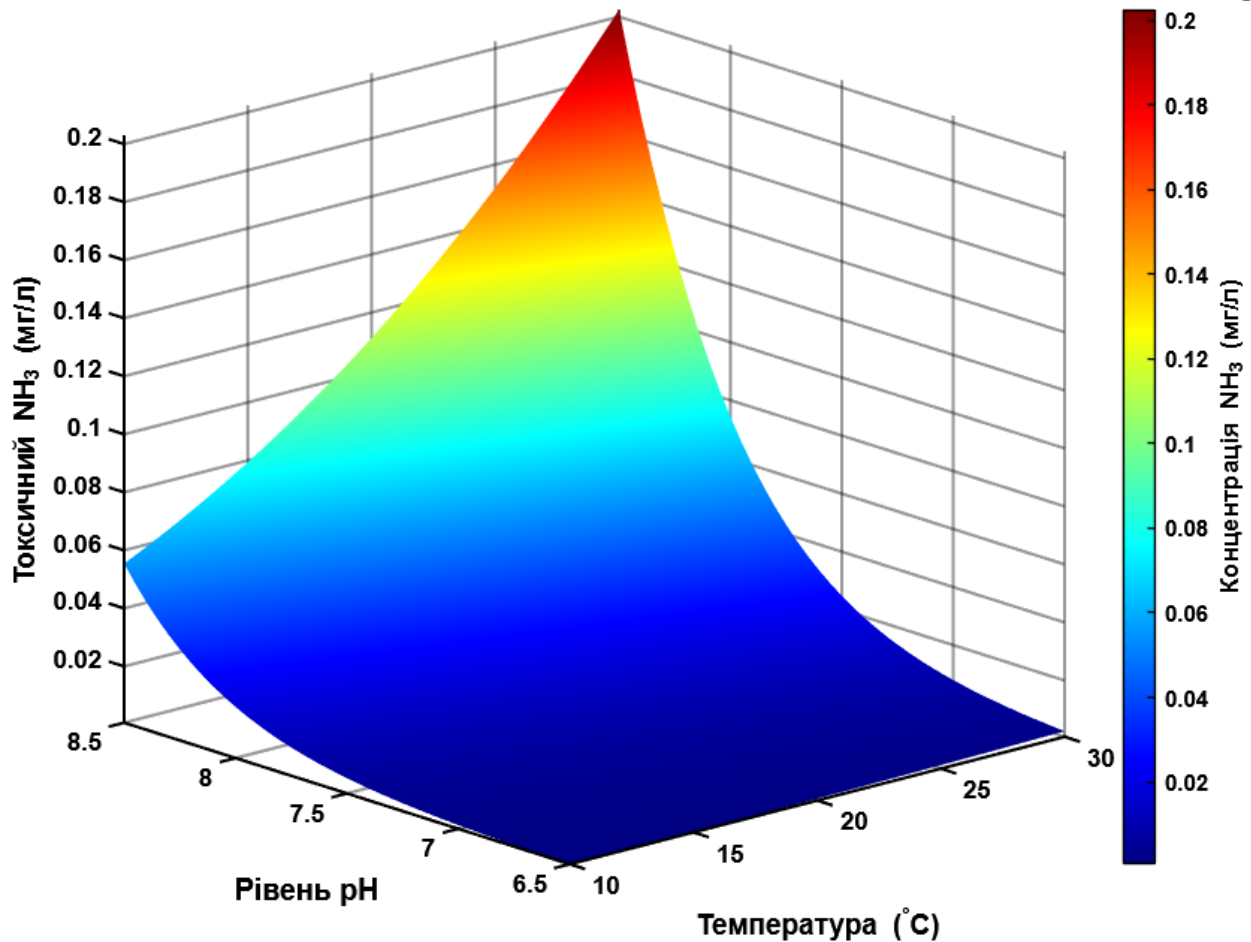


Рис. 3.8. 3D-графік поверхні залежності NH_3 від T і pH

Це підтверджує необхідність використання динамічних значень в алгоритмі роботи мікроконтролера STM32. Поріг увімкнення насоса заміни води повинен автоматично знижуватися при зростанні температури.

3.3.2. Дослідження ефективності алгоритмів цифрової фільтрації сигналів. Оскільки система працює з аналоговими датчиками MQ-137, TDS та SEN0189 в умовах промислових електромагнітних завад, критично важливим етапом проектування був вибір параметрів цифрового фільтра.

Для верифікації обраного методу експоненційного ковзного середнього, або ЕМА, було проведено імітаційне моделювання в середовищі MATLAB. Метою експерименту було визначення оптимального коефіцієнта згладжування α , який забезпечує достатнє придушення шуму без внесення критичної затримки, тобто фазового зсуву, у вимірювальний канал. На графіку, наведеному на

рисунку 3.9, представлено реакцію системи на вхідний вплив при різних значеннях коефіцієнта α .

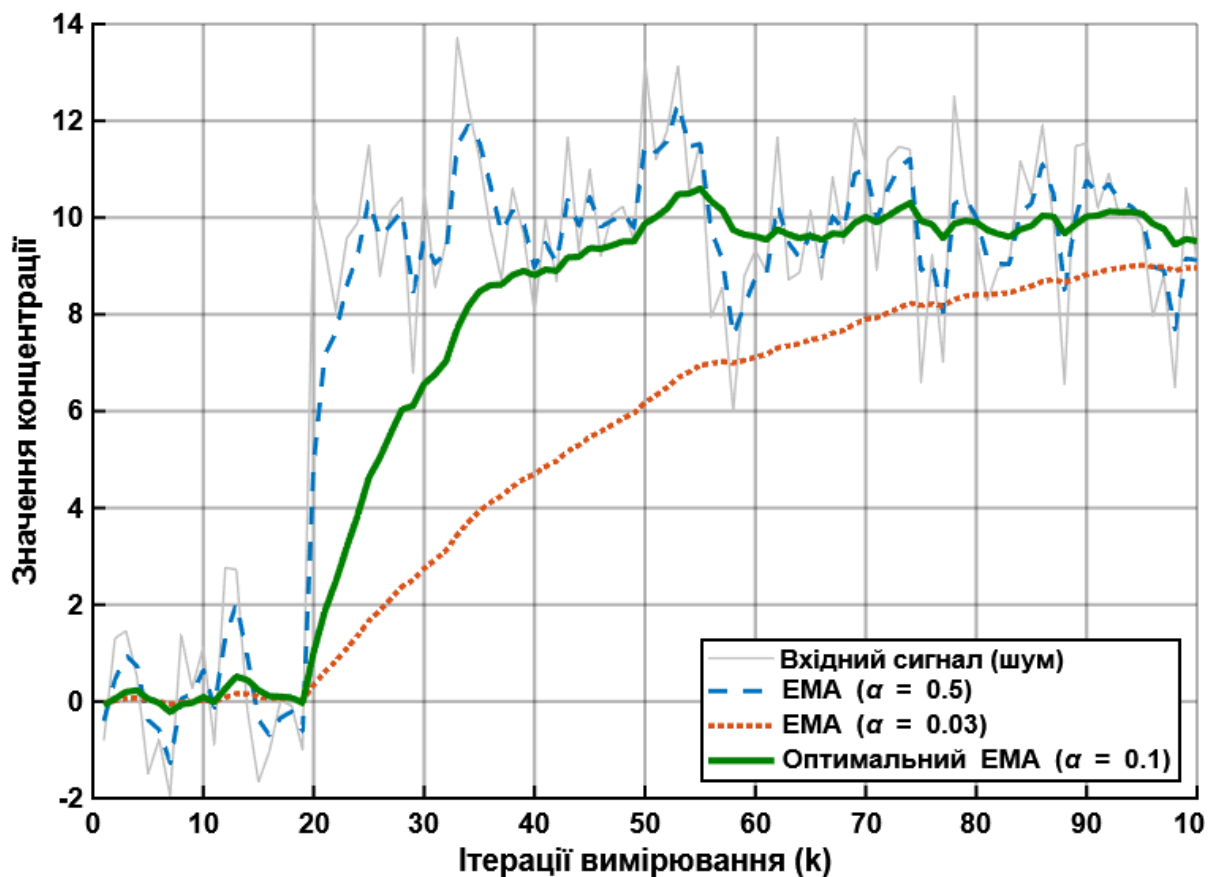


Рис. 3.9. Результати моделювання роботи фільтра ЕМА

Вхідний сигнал моделювався як сума корисного сигналу, що представляє стрибкоподібну зміну концентрації речовини, та випадкового шуму з нормальним розподілом, відомого як Білий шум Гаусса.

Результати моделювання показали, що при $\alpha=0.1$ досягається найкраще співвідношення сигнал/шум, амплітуда випадкових викидів зменшується у 5-7 разів, а час встановлення показів T_{90} не перевищує 10 ітерацій вимірювання, що є прийнятним для інерційних процесів аквакультури. Значення $\alpha=0.01$ призводить до надмірної інерційності, а $\alpha=0.5$ - до недостатньої фільтрації. Отримане оптимальне значення $\alpha=0.1$ було імплементоване у програмний код мікроконтролера STM32.

3.3.3. Моделювання динаміки терморегуляції та перевірка стійкості алгоритму з гістерезисом. Для верифікації параметрів системи термостабілізації було проведено моделювання процесу нагріву та охолодження резервуара.

В основу моделі покладено диференціальне рівняння теплового балансу, яке вирішувалося методом Ейлера з кроком дискретизації $\Delta t = 1$ с. Метою експерименту була перевірка адекватності синтезованого алгоритму релейного керування з гістерезисом, та підбір оптимальної ширини петлі гістерезису ΔT . При вхідних параметрах моделювання, об'єм води $V = 200$ л, потужність нагрівача $P = 500$ Вт, цільова температура $T_{set} = 22^\circ\text{C}$.

На отриманих часових діаграмах (див. рис. 3.10) відображено перехідний процес виходу системи на робочий режим та подальші автоколивання температури в межах заданого коридору.

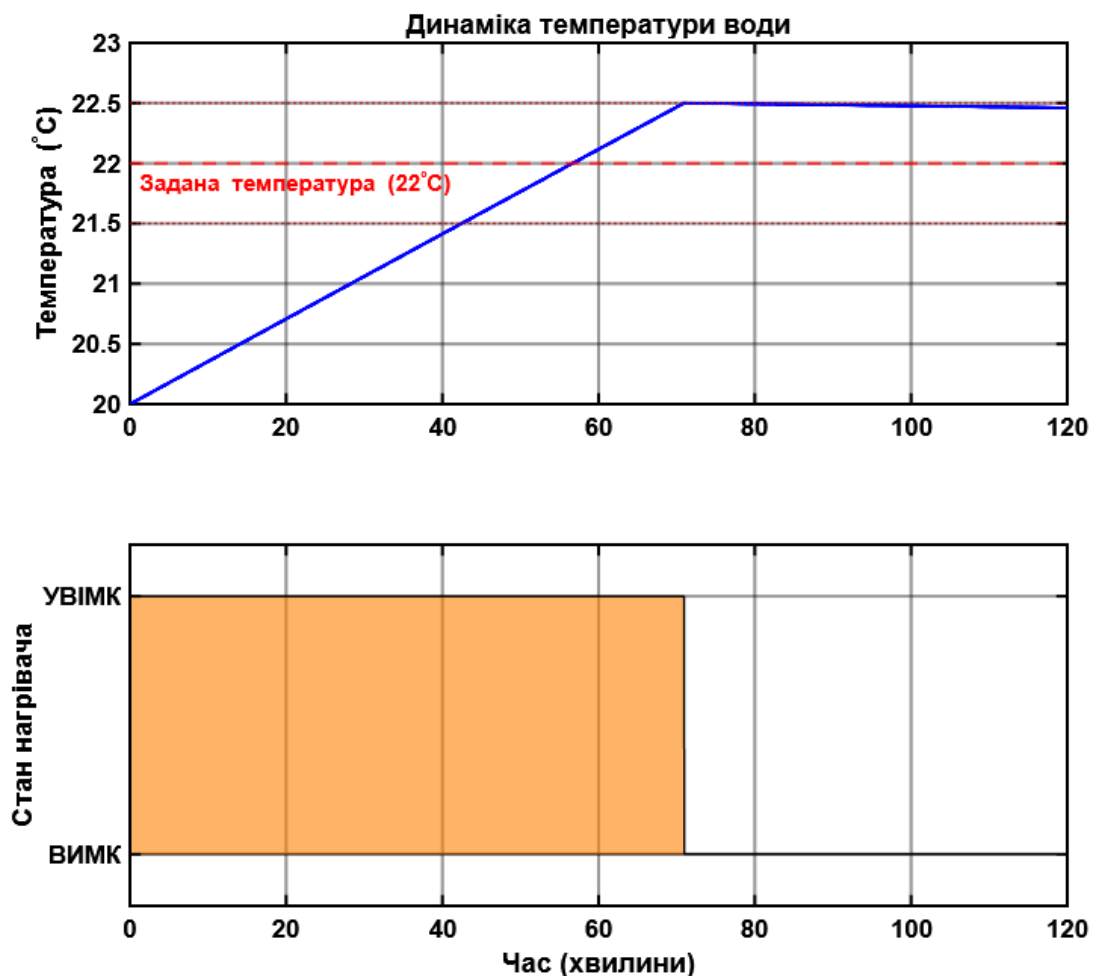


Рис. 3.10. Графік перехідного процесу терморегуляції

Наведений верхній графік наочно демонструє властивість теплової інерційності, яка притаманна досліджуваній водній масі. Аналізуючи криву, можна стверджувати, що процес нагріву середовища відбувається не лінійно, а підпорядковується експоненційному закону зміни температури в часі.

У свою чергу, нижній графік візуалізує логіку роботи виконавчого механізму системи керування, роль якого виконує реле. Проведене математичне моделювання підтвердило правильність вибору параметрів налаштування: встановлена ширина петлі гістерезису в діапазоні $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ гарантує стійку та стабільну роботу системи регулювання. Зокрема, це дозволяє повністю уникнути небажаного ефекту «брязкоту» контактів. Оскільки зафіксована частота перемикачів реле становить не більше 2–3 разів на годину, такий режим експлуатації суттєво зменшує знос компонентів і гарантує довговічність комутаційного обладнання.

Підсумовуючи результати етапу проєктування та технічної реалізації, варто зазначити, що в ході виконання магістерської роботи було здійснено повну практичну імплементацію розробленої архітектури апаратно-програмного комплексу. Інтеграція теоретичних моделей у фізичні пристрої підтвердила правильність обраної стратегії побудови розподіленої системи керування.

Створене вбудоване програмне забезпечення для керуючого мікроконтролера STM32, розроблене мовою C із використанням бібліотек рівня апаратних абстракцій, забезпечило високу ефективність використання обчислювальних ресурсів. Застосування технології прямого доступу до пам'яті (DMA) для збору даних із сенсорів дозволило розвантажити центральний процесор, що дало змогу інтегрувати ресурсомісткі математичні моделі розрахунку токсичності за Емерсоном та алгоритми цифрової фільтрації сигналів безпосередньо у цикл керування реального часу без порушення часових обмежень.

Функціональні можливості комплексу було суттєво розширено за рахунок розробки відмовостійкої підсистеми віддаленого моніторингу. Реалізація шлюзу на базі двоядерної системи на кристалі ESP32 під керуванням операційної системи реального часу FreeRTOS дозволила організувати стабільний міст між

енергоефективною мережею LoRa та глобальною мережею Інтернет. Це забезпечило гарантовану доставку телеметричних пакетів до хмарної платформи ThingsBoard через протокол MQTT навіть в умовах нестабільного з'єднання, надаючи оператору зручний та інформативний інтерфейс для диспетчерського контролю.

Комплексна верифікація системи, що проводилася у два етапи, засвідчила високу надійність розробленого рішення. Результати імітаційного моделювання термодинамічних процесів та роботи фільтрів у середовищі MATLAB продемонстрували збіжність з експериментальними даними, отриманими в ході натурних випробувань фізичного прототипу. Тестування підтвердило адекватність закладених алгоритмів адаптивного регулювання, високу метрологічну точність вимірювальних каналів та стійкість радіозв'язку в умовах промислових електромагнітних перешкод, що свідчить про повну відповідність розробленої системи технічним вимогам сучасної індустріальної аквакультури.

РОЗДІЛ 4

ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

4.1 Охорона праці

Адаптивне регулювання параметрів комп'ютерної системи для вирощування промислових видів риб є комплексним процесом, що діє в умовах агресивного промислового середовища з підвищеною вологістю. Забезпечення належного рівня охорони праці на всіх етапах життєвого циклу системи вимагає ідентифікації специфічних виробничих ризиків, а також впровадження ефективних інженерно-технічних заходів захисту.

Процес розробки комп'ютерної системи пов'язаний з тривалою взаємодією з дисплеями, що створює навантаження на опорно-руховий апарат, зокрема на м'язи шії та спини, а також призводить до суттєвого перенапруження зору. З метою мінімізації негативного впливу зазначених шкідливих виробничих факторів та збереження здоров'я, організація робочого місця була виконана з дотриманням «Вимог щодо безпеки та захисту здоров'я працівників під час роботи з екранними пристроями» (НПАОП 0.00-7.15-18) [26] та у відповідності до стандарту ДСТУ ISO 9241-5:2004 «Ергономічні вимоги до роботи з відеотерміналами в офісі. Частина 5. Вимоги до розташування робочого місця та постави» [27]. Практична реалізація цих нормативних документів забезпечується використанням спеціалізованих ергономічних меблів, конструкція яких передбачає можливість регулювання висоти робочої поверхні столу та зміни кута нахилу спинки крісла. Це дозволяє забезпечити підтримку природного фізіологічного вигину хребта та знизити втому. Розміщення монітора здійснено на оптимальній відстані від очей, що дозволяє утримувати голову у прямому положенні або з легким нахилом вперед без надмірного напруження м'язів шийно-комірцевої зони. Окрім того, використання сучасних периферійних пристроїв введення, оснащених спеціальними гелевими підставками для зап'ясть, є ефективним профілактичним заходом проти розвитку професійних захворювань рук, зокрема тунельного синдрому.

Важливим етапом є використання системи в умовах рибного господарства. Специфіка даного об'єкта характеризується наявністю агресивних умов навколишнього середовища: великих об'ємів відкритої води, наявністю струмопровідної підлоги та стабільно високою відносною вологістю повітря, яка в технологічних зонах може досягати граничних значень 95–100%. Відповідно до класифікації приміщень за ступенем небезпеки ураження електричним струмом, наведеної у чинних Правилах улаштування електроустановок (ПУЕ:2017) [28], такі умови дозволяють віднести виробничі приміщення аквакультури до категорії небезпечних. У такому середовищі будь-яке, навіть незначне пошкодження електричної ізоляції обладнання або утворення струмопровідних містків внаслідок потрапляння конденсату на струмоведучі частини, може призвести до винесення небезпечного електричного потенціалу на металеві конструкції або безпосередньо у водне середовище. Це створює пряму загрозу як для життя обслуговуючого персоналу, так і для життєдіяльності гідробіонтів, що вирощуються в системі.

Для зменшення ризиків електротравматизму експлуатація системи здійснюється у суворій відповідності до НПАОП 40.0-1.21-98 [29]. Інженерна реалізація захисних заходів включає використання багаторівневої системи безпеки. Живлення занурювальних датчиків та кіл керування переведено на безпечну напругу.

Окремий комплекс заходів безпеки стосується роботи з дозуванням реагентів, оскільки система здійснює корекцію рівня рН за допомогою дозування розчинів кислот та лугів. Враховуючи потенційну небезпеку опіків, поводження з цими реагентами регламентується Законом України «Про забезпечення хімічної безпеки та управління хімічною продукцією» [30], який впроваджує сучасні підходи до класифікації небезпек. У розробленій системі мінімізація ризиків досягається шляхом автоматизації процесу дозування через використання перистальтичних насосів, що виключає прямий контакт оператора з агресивними рідинами у штатному режимі роботи.

Таким чином, у процесі розробки методів і засобів комп'ютерної системи системи вирощування промислових видів риби, було реалізовано комплексний

підхід до охорони праці, який враховує специфічні фактори ризику експлуатації обладнання у вологому середовищі. Впровадження ергономічних рішень на робочому місці розробника та автоматизація роботи з хімічними реагентами дозволяють створити безпечні умови праці що відповідають сучасним нормативним вимогам.

4.2. Безпека в надзвичайних ситуаціях

4.2.1. Аварії на очисних спорудах стічних вод промислових підприємств з масовим викидом забруднюючих речовин. У контексті функціонування промислових об'єктів аквакультури, зокрема установок замкненого водопостачання. Система очищення стічних вод є критично важливим елементом технологічного циклу.

Аварії на таких спорудах можуть мати катастрофічні наслідки як для внутрішнього виробничого процесу, так і для навколишнього природного середовища. Стічні води рибних господарств характеризуються високим вмістом органічних речовин, сполук азоту (амонійного азоту, нітритів, нітратів) та фосфору.

Масовий викид цих забруднювачів у відкриті водойми внаслідок аварії призводить до різкого зниження вмісту кисню, та загибелі риб, що кваліфікується як надзвичайна ситуація екологічного характеру [31].

Основними причинами виникнення аварійних ситуацій на очисних спорудах є порушення технологічного регламенту експлуатації, відмова насосного та компресорного обладнання, перебої в електропостачанні, а також руйнування конструктивних елементів фільтрів та трубопроводів внаслідок корозії або механічних пошкоджень. Особливу небезпеку становить загибель активного мулу у біологічних фільтрах через припинення аерації або потрапляння токсичних речовин, що призводить до повного припинення процесу нітрифікації та, як наслідок, до залпового викиду неочищеної води з високою концентрацією аміаку.

Для запобігання виникненню таких аварій на підприємстві впроваджуються автоматизовані системи моніторингу, подібні до розробленої у даній магістерській роботі. Безперервний контроль параметрів води на виході з очисних споруд, зокрема, каламутності та вмісту аміаку, і дозволяє виявити відхилення від норми на ранній стадії та вжити запобіжних заходів. У разі виникнення аварії першочергові дії персоналу спрямовуються на локалізацію джерела забруднення. Технологічна схема підприємства повинна передбачати наявність аварійних ємностей для тимчасового акумулювання неочищених стічних вод, що дозволяє уникнути їх потрапляння у зовнішнє середовище до моменту відновлення працездатності очисних споруд.

Ліквідація наслідків аварії включає проведення ремонтно-відновлювальних робіт на пошкоджених ділянках, відновлення популяції бактерій у біофільтрах, а також заходи з дезінфекції території та обладнання. Важливим елементом безпеки є забезпечення резервного електроживлення для ключових вузлів системи очищення, що мінімізує ризик виникнення аварій через знеструмлення об'єкта. Розроблена система керування завдяки своїй автономності та незалежності від зовнішніх мереж зв'язку здатна функціонувати в умовах надзвичайної ситуації, забезпечуючи передачу тривожних сигналів диспетчеру для оперативної реакції.

4.2.2. Організація та основні способи ліквідації наслідків повеней та паводків на промисловому підприємстві. Промислові об'єкти аквакультури часто розташовуються у безпосередній близькості до природних джерел води (річок, озер), що відносить їх до зони підвищеного ризику підтоплення під час повеней та паводків.

Гідрологічні надзвичайні ситуації становлять пряму загрозу цілісності гідротехнічних споруд, збереженню матеріальних цінностей та життю персоналу. Затоплення території підприємства може призвести до розмивання дамб ставків, втрати вирощуваної риби, короткого замикання в електромережах та виходу з ладу дорогого електронного обладнання, включаючи розроблену

систему автоматизації. Крім того, паводкові води несуть значну кількість бруду, сміття та патогенних мікроорганізмів, що створює ризик епізоотій серед риб.

Організація захисту підприємства від повеней базується на проведенні комплексу превентивних інженерно-технічних заходів [32]. До них належать спорудження та регулярне обстеження захисних дамб, забезпечення справності дренажних систем та зливової каналізації, а також герметизація вводів інженерних комунікацій у виробничі приміщення. Важливою складовою підготовки є планування розміщення електронного обладнання та резервних джерел живлення на безпечній висоті, що перевищує прогнозований рівень підйому води. Розроблена система моніторингу, завдяки використанню бездротових технологій, дозволяє розміщувати базову станцію та керуюче обладнання у захищених місцях, мінімізуючи ризик їх затоплення.

У разі отримання штормового попередження або виявлення ознак критичного підняття рівня води у прилеглих водоймах, на підприємстві невідкладно вводиться режим підвищеної готовності. Згідно з планом ліквідації аварійних ситуацій, оперативний персонал здійснює превентивне відключення електропостачання на тих виробничих ділянках та у підвальних приміщеннях, що підлягають ймовірному затопленню. Цей захід є обов'язковим для запобігання виникненню коротких замикань, які можуть спричинити пожежі, а також для унеможливлення масового ураження електричним струмом людей та гідробіонтів через воду.

Паралельно проводиться термінова герметизація технологічних ємностей та басейнів з рибою. Це критично важливо для забезпечення біологічної безпеки об'єкта, оскільки паводкові води часто несуть із собою значну кількість бруду, агрохімікатів з полів та патогенних мікроорганізмів. Потрапляння таких вод всередину замкненої системи вирощування промислових видів риб може призвести до масового отруєння популяції або спалаху інфекцій. Крім того, організовується цілодобове чергування аварійних бригад, які здійснюють безперервний моніторинг динаміки рівня води та перевірку цілісності захисних гідротехнічних споруд.

Основними технічними способами ліквідації наслідків підтоплення після стабілізації ситуації є оперативне відкачування води із затоплених технологічних приміщень, кабельних каналів та підвалів. Для цього залучаються потужні дренажні системи та мобільні мотопомпи. Наступним кроком є механічне очищення території та обладнання від наносів мулу, піску та сміття, які можуть блокувати роботу вентиляційних систем та рухомих частин механізмів. Також проводяться роботи з відновлення пошкоджених інженерних комунікацій (трубопроводів водопостачання, каналізації, ліній зв'язку).

Критично важливим та найбільш відповідальним етапом відновлювальних робіт є ревізія стану силового електрообладнання та кабельних ліній. Категорично забороняється подача напруги без попередньої інструментальної перевірки опору ізоляції, оскільки проникнення вологи всередину корпусів розподільчих щитів або під оболонку кабелів може призвести до пробоя ізоляції та виходу з ладу дороговартісної апаратури.

Специфіка рибницьких господарств вимагає проведення обов'язкової повної дезінфекції території, виробничих потужностей та інвентарю після сходу води. Це необхідно для запобігання спалахам інфекційних захворювань (епізоотій), збудники яких могли бути занесені із зовнішнього середовища.

Відновлення штатного режиму роботи розробленої автоматизованої системи керування розпочинається з діагностики апаратної частини. Першочергово виконується перевірка фізичної цілісності та герметичності корпусів сенсорів, які могли перебувати у зоні підтоплення. Обов'язковою процедурою є повторне калібрування вимірювальних каналів (зокрема датчиків рН, кисню та аміаку), оскільки вплив надмірної вологості, забруднення чутливих елементів мулом або механічні пошкодження могли призвести до суттєвого зміщення їх метрологічних характеристик та появи похибки вимірювань.

ВИСНОВКИ

В цій кваліфікаційній роботі проведено детальний аналіз методів і засобів адаптивного керування параметрами водного середовища для підвищення ефективності та біологічної безпеки процесу вирощування риби.

Проаналізовано технологічні вимоги до параметрів водного середовища аквакультури та існуючі методи автоматизації, виявлено недоліки наявних промислових та бюджетних рішень, що дозволило обґрунтувати необхідність врахування нелінійних взаємозв'язків між параметрами екосистеми, зокрема температурою, рН та концентрацією токсичних сполук.

Здійснено математичне моделювання динаміки теплових процесів та кінетики хімічної рівноваги токсичних сполук із застосуванням моделі Емерсона, що дозволило синтезувати алгоритми адаптивного керування виконавчими механізмами з використанням позиційного закону регулювання з гістерезисом та динамічної корекції для мінімізації ризиків отруєння гідробіонтів.

Розроблено структурно-функціональну схему комп'ютерної системи, яка базується на трирівневій архітектурі, поєднуючи локальний контур керування реального часу на базі мікроконтролера STM32 та канал дальньої телеметрії з використанням IoT-шлюзу на базі платформи ESP32.

Запропоновано практичну реалізацію програмного забезпечення здійснювати з використанням енергоефективного протоколу LoRa для передачі телеметрії та інтеграції з хмарною платформою ThingsBoard через протокол MQTT, що забезпечує надійність системи, її автономність та можливість зручного віддаленого моніторингу і диспетчерського керування.

Проведено верифікацію розроблених рішень шляхом імітаційного моделювання в середовищі MATLAB, результати якого підтвердили адекватність математичних моделей та ефективність запропонованих алгоритмів у підтримці параметрів водного середовища в заданих межах з високою точністю.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Луцик Н.С., Луцків А.М., Осухівська Г.М., Тиш Є.В. Програма та методичні рекомендації з проходження практики за тематикою кваліфікаційної роботи для студентів спеціальності 123 «Комп'ютерна інженерія» другого (магістерського) рівня вищої освіти усіх форм навчання. Тернопіль: ТНТУ, 2024. 45 с.
2. Луцик Н.С., Луцків А.М., Осухівська Г.М., Тиш Є.В. Методичні рекомендації до виконання кваліфікаційної роботи магістра для студентів спеціальності 123 «Комп'ютерна інженерія» другого (магістерського) рівня вищої освіти усіх форм навчання. Тернопіль, 2024. 44 с.
3. Варавін А.В., Лещишин Ю.З., Чайковський А.В. Методичні вказівки до виконання курсового проєкту з дисципліни «Дослідження і проєктування комп'ютерних систем та мереж» для здобувачів другого (магістерського) рівня вищої освіти спеціальності 123 «Комп'ютерна інженерія» усіх форм навчання. Тернопіль: ТНТУ, 2024. 32 с.
4. Lekang O. I. Aquaculture Engineering / O. I. Lekang. — 2-ге видання — Chichester : Wiley-Blackwell, 2013. — 432 с.
5. Timmons M. B. Recirculating Aquaculture / M. B. Timmons, J. M. Ebeling. — 3-тє видання — Ithaca : Ithaca Publishing Company, 2013. — 975 с.
6. OxyGuard Pacific. Advanced Monitoring and Control Unit. System Description. URL: <https://www.oxyguard.dk/en/systems/pacific/> (дата звернення: 18.11.2025).
7. Neptune Systems. Apex A3 Series: The Ultimate Aquarium Control. URL: <https://www.neptunesystems.com/apex-a3-series/> (дата звернення: 18.11.2025).
8. Raju K., Varma G. Knowledge Based Real Time Monitoring System for Aquaculture Using IoT. 2017 International Conference on Intelligent Computing and Control Systems (ICICCS). Madurai, India, 2017. P. 138–143. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8250440> (дата звернення: 19.11.2025).

9. Parra L., Sendra S., Lloret J., Bosch I. Design and Deployment of Low-Cost Sensors for Monitoring the Water Quality and Fish Behavior in Aquaculture Tanks during the Feeding Process. *Sensors*. 2018. Vol. 18, No. 3. P. 750. URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/18/3/750> (дата звернення: 19.11.2025).
10. Baena-Navarro R. Intelligent Prediction and Continuous Monitoring of Water Quality in Aquaculture. *Water*. 2020. Vol. 17, No. 1. P. 82. URL: <https://www.mdpi.com/2073-4441/12/1/82> (дата звернення: 20.11.2025).
11. Паламар М.І., Стрембіцький М.О., Паламар А.М. Проектування комп'ютеризованих вимірювальних систем і комплексів: навч. посіб. Тернопіль: ТНТУ, 2019. 150 с.
12. Palamar A., Karpinski M., Palamar M., Osukhivska H., Mytnyk M. Remote Air Pollution Monitoring System Based on Internet of Things. *CEUR Workshop Proceedings, 2nd International Workshop on Information Technologies: Theoretical and Applied Problems (ITTAP 2022)*, Ternopil, Ukraine, November 22–24, 2022. Vol. 3309. P. 194-204.
13. Лещишин Ю.З., Назаревич Т.О., Міська І.В. Створення вбудованих систем на базі структурно - параметричних моделей цифрових каналів зв'язку. VIII Науково-технічна конференція «Інформаційні моделі, системи та технології». Тернопіль, 2020. С. 127.
14. Романов Д.В., Осухівська Г.М., Паламар А.М. Функціональна схема системи керування зовнішнім освітленням на основі технології LoRa. Матеріали IX науково-технічної конференції "Інформаційні моделі, системи та технології" Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя (Тернопіль, 8–9 грудня 2021 року). Тернопіль: ТНТУ, 2021. С. 124.
15. Лещишин Ю.З., Назаревич Т.О., Міська І.В. Створення вбудованих систем на базі структурно - параметричних моделей цифрових каналів зв'язку. VIII Науково-технічна конференція «Інформаційні моделі, системи та технології». Тернопіль, 2020. С. 127.
16. Ясінський Р.В., Осухівська Г.М., Паламар А.М. Апаратно-програмна система для регулювання мікроклімату теплиць. Матеріали X науково-технічної конференції «Інформаційні моделі, системи та технології» Тернопільського

національного технічного університету імені Івана Пулюя (Тернопіль, 7-8 грудня 2022 року). Тернопіль: ТНТУ, 2022. С. 102.

17. Lea P. Internet of Things for Architects. Packt Publishing, 2018. 486 p.
18. Augustin A., Yi J., Clausen T., Townsley W. M. A Study of LoRa: Long Range & Low Power Networks for the Internet of Things. Sensors. 2016. Vol. 16, No. 9. P. 1466. URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/16/9/1466> (дата звернення: 24.11.2025).
19. LoRaWAN 1.1 Specification. LoRa Alliance, 2017. URL: <https://loralliance.org/resource-hub/lorawan-specification-v1-1/> (дата звернення: 25.11.2025).
20. MQTT Version 5.0. OASIS Standard. 2019. URL: <https://docs.oasis-open.org/mqtt/mqtt/v5.0/mqtt-v5.0.html> (дата звернення: 26.11.2025).
21. Emerson K., Russo R. C., Lund R. E., Thurston R. V. Aqueous Ammonia Equilibrium Calculations: Effect of pH and Temperature. Journal of the Fisheries Research Board of Canada. 1975. Vol. 32, No. 12. P. 2379–2383.
22. Dorf R. C., Bishop R. H. Modern Control Systems. 13-те видання. Pearson, 2016. 1045 p.
23. Lyons R. G. Understanding Digital Signal Processing. 3-тє видання. Prentice Hall, 2010. 992 p.
24. Атаманчук Ю.А, Лецишин Ю.З. Методи і засоби адаптивного регулювання параметрів комп'ютерної системи вирощування промислових видів риби. Матеріали XIV міжнародної науково-технічної конференції молодих учнів та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій» (11-12 грудня 2025 року). Тернопіль: ТНТУ, 2025. С. 226
25. Атаманчук Ю.А, Лецишин Ю.З. Моніторинг та адаптивне керування рівня токсичності водного середовища в аквакультурі. Матеріали XIII науково-технічної конференції «Інформаційні моделі, системи та технології» (17-18 грудня 2025 року). Тернопіль: ТНТУ, 2025. С. 104
26. Вимоги щодо безпеки та захисту здоров'я працівників під час роботи з екранними пристроями. Затв. наказом Мінсоцполітики України від 14.02.2018 № 207 (НПАОП 0.00-7.15-18). Київ, 2018.

27. ДСТУ ISO 9241-5:2004. Ергономічні вимоги до роботи з відеотерміналами в офісі. Частина 5. Вимоги до розташування робочого місця та постави. Київ, 2005. 26 с.

28. Правила улаштування електроустановок. Затв. наказом Міненерговугілля України 21.07.2017 № 476. Чинний від 24.02.2017. Київ: Форт, 2017. 617 с.

29. Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів. Затв. наказом Держнаглядохоронпраці Чинний від 09.01.1998 № 4. Київ: Основа, 1998. 382 с.

30. Про забезпечення хімічної безпеки та управління хімічною продукцією: Закон України від 01.12.2022 № 2804-IX. Київ: Парламентське видавництво, 2023. 68 с.

31. Стручок В.С. Безпека в надзвичайних ситуаціях : метод. посіб. для здобувачів освіт. ступеня «магістр» всіх спеціальностей. Тернопіль : ФОП Паляниця В. А., 2023. 156 с. URL: <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/39196> (дата звернення: 08.12.2025).

32. Стручок В.С. Техноекологія та цивільна безпека. Частина «Цивільна безпека» : навч. посіб. Тернопіль : ФОП Паляниця В. А., 2023. 156 с. URL: <http://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/39424> (дата звернення: 09.12.2025).

Додаток А
Тези конференції

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя
Маріборський університет (Словенія)
Технічний університет у Кошице (Словаччина)
Вільнюський технічний університет ім. Гедимінаса (Литва)
Краківський економічний університет (Польща)
Вроцлавський економічний університет (Польща)
Університет «Опольська Політехніка» (Польща)
Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»
Вінницький національний аграрний університет
Львівський національний університет ім. І. Франка
Головне управління Пенсійного фонду в Тернопільській області
Наукове товариство ім. Шевченка
Тернопільський обласний комунальний інститут післядипломної педагогічної освіти
Сумський державний педагогічний університет
Запорізький національний університет

**АКТУАЛЬНІ ЗАДАЧІ
СУЧАСНИХ ТЕХНОЛОГІЙ**

Збірник

тез доповідей

**XIV Міжнародної науково-технічної
конференції молодих учених та студентів
11-12 грудня 2025 року**



**УКРАЇНА
ТЕРНОПІЛЬ – 2025**

42.	Р.В. Хорошун, Н.В.Іванюк, С.В. Конопацький, В.І. Мельник РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ АДАПТИВНОЇ ПІДВІСКИ АВТОМОБІЛЯ	211
43.	Р.В. Хорошун, Т.С. Балко, О.Б. Ільків, І.В. Качан РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ВІБРОПРИСКОРЕННЯ АДАПТИВНОЇ ПІДВІСКИ	213
44.	Т.Р. Чайковський, А.І. Рифун, О.В. Наконечний ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМ РОЗПОДІЛУ ГАЛЬМІВНИХ ЗУСИЛЬ ТА КЕРОВАНОСТІ АВТОМОБІЛЯ	215
45.	І.Ю. Чепига, П.М. Купий, М.І. Купий УЗАГАЛЬНЕНА РОЗРАХУНКОВА СХЕМА КУЗОВА ТА ПІДВІСКИ АВТОМОБІЛЯ	217
46.	Т.В. Чорний, М.Г. Левкович, М.В. Костюк ДОСЛІДЖЕННЯ ВЕЛИЧИН ГАЛЬМІВНОГО МОМЕНТУ В БАРАБАННОМУ ГАЛЬМІ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ	218
СЕКЦІЯ 5 КОМП'ЮТЕРНО-ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА СИСТЕМИ ЗВ'ЯЗКУ		
1.	Д.Т. Антонюк ВІПРОВАДЖЕННЯ LLM У ВЕБСЕРВІС ДЛЯ ВІДПОВІДЕЙ ЗА ДОПОМОГОЮ AZURE OPENAI	223
2.	В.І. Антонюк, Н.С. Луцук, А.М. Паламар КОМП'ЮТЕРИЗОВАНА ІОТ-СИСТЕМА ДЛЯ АНАЛІЗУ СПОЖИВАННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ У ЖИТЛОВИХ ПРИМІЩЕННЯХ	225
3.	Ю.Атаманчук, Ю. Лещинин МЕТОДИ І ЗАСОБИ АДАПТИВНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ КОМП'ЮТЕРНОЇ СИСТЕМИ ВИРОЩУВАННЯ ПРОМИСЛОВИХ ВИДІВ РИБ	226
4.	П. Бартків ОПТИМІЗАЦІЯ РОБОТИ БЕЗПРОВОДНИХ РАДІОМЕРЕЖ СЕНСОРНИХ ВУЗЛІВ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ МЕТОДІВ МАШИННОГО НАВЧАННЯ	228
5.	І.В. Бенцал, Л. П. Дмитроца АНАЛІЗ OPEN-SOURCE РІШЕНЬ ДЛЯ МОНИТОРИНГУ СТАНУ БДЖОЛОСІМЕЙ	229
6.	Д.В. Боднар, Г.І. Ляпак ЕФЕКТИВНІСТЬ РІЗНИХ ПІДХОДІВ СЕНТИМЕНТ-АНАЛІЗУ У ДОСЛІДЖЕННІ СОЦІАЛЬНИХ МЕРЕЖ	230
7.	Д.А. Бойко УДОСКОНАЛЕННЯ ІНФОРМАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОГО СОРТУВАННЯ ДАНИХ ДЛЯ ІНТЕГРАЦІЇ В «GOOGLE DRIVE API» НА ОСНОВІ КОНТЕНТУ	233
8.	Р.П. Вархоляк ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ СИСТЕМ АВТОМАТИЗАЦІЇ ДЛЯ КОНТРОЛЮ ТИСКУ ТА ТЕМПЕРАТУРИ В ПРОМИСЛОВИХ УМОВАХ	235
9.	О.А.Вінніченко ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАСТОСУВАННЯ ВЕЛИКИХ МОВНИХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦІЇ ГЕНЕРАЦІЇ ТЕСТІВ ТА АНАЛІЗУ РЕЗУЛЬТАТІВ ПРИ ПЕРЕВІРЦІ WORDPRESS ПЛАГІАТІВ	237

УДК 681.5

Ю. Атаманчук, здобувач вищої освіти

Ю. Лещишин, канд. техн. наук, доцент

Тернопільський національний технічний університет імені І. Пулюя, Україна

МЕТОДИ І ЗАСОБИ АДАПТИВНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ КОМП'ЮТЕРНОЇ СИСТЕМИ ВИРОЩУВАННЯ ПРОМИСЛОВИХ ВИДІВ РИБ

Y. Atamanchuk, higher education applicant

Y. Leshchyshyn, Ph.D., Associate Prof.

METHODS AND MEANS OF ADAPTIVE CONTROL OF COMPUTER SYSTEM PARAMETERS FOR THE CULTIVATION OF INDUSTRIAL FISH SPECIES

Стабільність параметрів середовища вирощування промислових видів риб є ключовою вимогою, оскільки відхилення температури або рівня кисню впливають на працездатність усієї інфраструктури. Поширені схеми керування в таких системах працюють за принципом простого перемикання при досягненні порогових значень, що не дає можливості точно враховувати зміну процесів у часі. Через це виникають коливання параметрів середовища, і система не може підтримувати потрібні значення з достатньою точністю[1].

Щоб реалізувати адаптивне регулювання, необхідно описати роботу середовища вирощування промислових видів риб у вигляді математичних моделей. Для контролю температури використовується рівняння теплового балансу, у якому враховується об'єм води, теплоємність, теплова потужність нагрівача, ефективність нагрівача та втрати тепла через поверхню середовища[2]. Така модель показує, як температура змінюється у відповідь на керуючі дії та зовнішні умови, і дозволяє визначити, який вплив потрібно сформувати для стабілізації процесу.

$$C_v \cdot V \cdot \frac{dT(t)}{dt} = P(t) \cdot \eta - k_{loss} \cdot S \cdot (T(t) - T_{amb}) \quad (1.1)$$

де C_v – питома об'ємна теплоємність води;

V – об'єм води;

$P(t)$ – керуюча теплова потужність;

η – ККД нагрівача;

k_{loss} – узагальнений коефіцієнт тепловтрат;

S – площа поверхні;

T_{amb} – температура зовнішнього середовища.

Для керування системою аерації планується застосувати модель динаміки концентрації розчиненого кисню $C(t)$, що базується на рівнянні масопереносу [2]:

$$\frac{dC(t)}{dt} = K_L a \cdot (C_{sat} - C(t)) - R(t) \quad (1.2)$$

де $K_L a$ – об'ємний коефіцієнт масопередачі;

C_{sat} – концентрація насичення;

$R(t)$ – швидкість споживання кисню біомасою.

Аналогічно концентрація кисню описується рівнянням масопереносу, що враховує роботу аератора, можливу концентрацію насичення та швидкість споживання кисню[3]. Ця модель дає можливість прогнозувати зміну концентрації кисню в реальному часі, а також визначити, коли система повинна коригувати роботу аератора.

$$u[k] = K_p \cdot e[k] + K_i \cdot T_s \sum_{i=0}^k e[i] + K_d \frac{e[k] - e[k-1]}{T_s} \quad (1.3)$$

де $u[k]$ – розрахований керуючий вплив;

$e[k]$ – помилка регулювання;

T_s – період дискретизації.

Оскільки температурний та кисневий процеси мають інерційні властивості та змінюються з певною затримкою, система керування потребує алгоритму, здатного працювати у дискретному режимі та формувати керуючий вплив, що компенсує ці властивості. Для цього застосовується цифровий ПІД-алгоритм, який розраховує управляючу дію у кожен момент часу на основі різниці між поточним і потрібним значенням параметра[4].

Об'єднання цих моделей та алгоритмів формує основу комп'ютерної системи адаптивного керування параметрами середовища вирощування промислових видів риб. Такий підхід дозволяє підвищити точність регулювання, запобігти небажаним коливанням і забезпечити стабільну роботу системи, що є основною вимогою для автоматизованого контролю цього типу.

Література

1. Boyd C. E. Water Quality: An Introduction. 3rd Edition. Springer, 2020. 440 p. URL: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-030-23335-8>.
2. Kayombo S. et al. Mathematical Modeling of Dissolved Oxygen in Fish Ponds. *Simulation*. 2000. URL: https://www.researchgate.net/publication/285314378_Mathematical_Modeling_of_Dissolved_Oxygen_in_Fish_Ponds.
3. Sozański K. Low Cost PID Controller for Student Digital Control Laboratory Based on Arduino or STM32 Modules. *Electronics*. 2023. Vol. 12, Iss. 15. 3235. URL: <https://www.mdpi.com/2079-9292/12/15/3235>.
4. Fandiño Pelayo J. S., et al. Smart water quality regulation in sustainable aquaponics using PID control and long-term performance analysis. *Sustainable Engineering and Innovation*. 2025. Vol. 7, No. 2. P. 521–536. URL: https://www.researchgate.net/publication/396413177_Smart_water_quality_regulation_in_sustainable_aquaponics_using_PID_control_and_long-term_performance_analysis.

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ТЕРНОПІЛЬСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ІВАНА ПУЛЮЯ**

МАТЕРІАЛИ

ХІІІ НАУКОВО-ТЕХНІЧНОЇ КОНФЕРЕНЦІЇ

**«ІНФОРМАЦІЙНІ МОДЕЛІ,
СИСТЕМИ ТА ТЕХНОЛОГІЇ»**



17-18 грудня 2025 року

**ТЕРНОПІЛЬ
2025**

НИЖНЬОЇ КІНЦІВКИ	
R. Andreychuk, V. Skorevych, L. Dediv, V. Dozorskyi, O. Dozorska	
THE CONCEPT OF PROPRIOCEPTIVE SYSTEM IMPLEMENTATION FOR LOWER LIMB PROSTHESIS	
Ю. Атаманчук, Ю. Лещишин	
МОНІТОРИНГ ТА АДАПТИВНЕ КЕРУВАННЯ РІВНЯ ТОКСИЧНОСТІ ВОДНОГО СЕРЕДОВИЩА В АКВАКУЛЬТУРІ	
Y. Atamanchuk, Y. Leshchyshyn	
MONITORING AND ADAPTIVE CONTROL OF WATER TOXICITY LEVEL IN AQUACULTURE	104
І. Бородій, Г. Осухівська	
ПРОЄКТУВАННЯ ІОТ-СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ ТА ПРОГНОЗУВАННЯ МІКРОКЛІМАТУ ЖИТЛОВИХ ПРИМІЩЕНЬ НА БАЗІ EDGE AI	
I. Borodii, H. Osukhivska	
DESIGNING AN IoT SYSTEM FOR MONITORING AND FORECASTING THE MICROCLIMATE OF RESIDENTIAL PREMISES BASED ON EDGE AI	106
А. Дерев'яний, Б. Павліковський, О. Голотенко	
ВЗАЄМОЗВ'ЯЗОК МЕРЕЖ НАСТУПНОГО ПОКОЛІННЯ (NGN) ТА ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ (IoT)	
A. Derevianyi, B. Pavlikovskiy, O. Holotenko	
INTERRELATION BETWEEN NEXT GENERATION NETWORKS (NGN) AND THE INTERNET OF THINGS (IoT)	107
Н. Демчан, Р. Жаровський	
ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ ПРОГРАМНО-АПАРАТНОГО КОМПЛЕКСУ КОНТРОЛЮ ЗА ВИРОЩУВАННЯ РОСЛИН З УРАХУВАННЯМ ЕВАПОТРАНСPIРАЦІЇ	
N. Demchan, R. Jarovski	
ASSESSMENT OF THE EFFICIENCY OF THE SOFTWARE AND HARDWARE COMPLEX FOR CONTROL OF PLANT GROWTH WITH INCLUDES OF EVAPOTRANSPIRATION	108
В. Дерягін, М. Дрогобицький, Н. Луцьк	
МЕТОДИ МОНІТОРИНГУ ТА ОПТИМІЗАЦІЇ ВЗАЄМОДІЇ МІКРОСЕРВІСІВ В ISTIO SERVICE MESH	
V. Deriahin, M. Drohobytzkyi, N. Lutsyk	
METHODS OF MONITORING AND OPTIMIZATION OF MICROSERVICES INTERACTION IN ISTIO SERVICE MESH	111
Я. Долгушин, Є. Тиш	
ФУНКЦІОНАЛЬНА МОДЕЛЬ ТА МЕТОДИ ОПТИМІЗАЦІЇ ЗАТРИМОК У ТРАНСЛЯЦІЇ ПРОТОКОЛІВ MODBUS RTU-TCP	
Y. Dolhushyn, Ye. Tysh	
FUNCTIONAL MODEL AND METHODS FOR LATENCY OPTIMIZATION IN MODBUS RTU-TCP PROTOCOL TRANSLATION	112
Я. Долгушин, Є. Тиш	
РОЗРОБКА АЛГОРИТМУ АДАПТАЦІЇ ПРОТОКОЛУ MODBUS ДЛЯ ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ У СИСТЕМІ ПОТ ЧЕРЕЗ ПРОТОКОЛ MQTT	
Y. Dolhushyn, Ye. Tysh	
DEVELOPMENT OF AN ALGORITHM FOR ADAPTING THE MODBUS PROTOCOL FOR DATA TRANSMISSION TO POT SYSTEMS VIA MQTT	113
Є. Голотенко, Р. Корольок	
МІКРОКОНТРОЛЕРИ ПРОМИСЛОВОГО ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ: ОГЛЯД АРХІТЕКТУР	114

УДК 681.5

Ю. Атаманчук; Ю. Лещишин, к. т. н.

(Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна)

МОНІТОРИНГ ТА АДАПТИВНЕ КЕРУВАННЯ РІВНЯ ТОКСИЧНОСТІ ВОДНОГО СЕРЕДОВИЩА В АКВАКУЛЬТУРІ

UDC 681.5

Y. Atamanchuk; Y. Leshchyshyn, PhD.

MONITORING AND ADAPTIVE CONTROL OF WATER TOXICITY LEVEL IN AQUACULTURE

Ефективність функціонування установок замкненого водопостачання (УЗВ) безпосередньо залежить від підтримання стабільного гідрохімічного режиму. Серед ключових параметрів якості води критичним є вміст азотовмісних сполук, зокрема аміаку, який є основним продуктом метаболізму гідробіонтів. У промисловій практиці моніторинг часто обмежується вимірюванням загального аміачного азоту (TAN), проте детальний вплив на рибу здійснює лише його неіонізована форма (NH_3). Частка цієї токсичної речовини не є статичною, а змінюється за нелінійним законом залежно від температури та водневого показника (pH) середовища [1].

У роботі запропоновано метод автоматизованого керування якістю води, який базується на динамічному розрахунку індексу токсичності. На відміну від класичних порогових алгоритмів, розроблена система прогнозує рівень біологічної небезпеки, використовуючи математичну модель Емерсона:

$$\text{NH}_3 = \frac{\text{TAN}}{1 + 10^{pK_a - \text{pH}}}, \quad (1)$$

де TAN – поточна концентрація загального азоту;

pK_a – константа дисоціації, що залежить від температури води (T).

Для практичної реалізації системи обрано архітектуру розподіленої бездротової сенсорної мережі. На відміну від традиційних дротових рішень, запропонований апаратно-програмний комплекс використовує енергоефективні вузли для збору даних з датчиків та технологію LoRaWAN для їх передачі. Такий підхід дозволяє розгорнути систему моніторингу на значних площах без необхідності прокладання складної кабельної інфраструктури, яка є вразливою до агресивного вологого середовища [2, 3]. Використання бюджетних компонентів та інтеграція з хмарними сервісами забезпечує економічну доцільність впровадження системи навіть у малих фермерських господарствах [4].

Проведене моделювання (рис. 1) підтвердило, що при незмінному рівні загального азоту підвищення температури води з 15°C до 25°C у поєднанні зі зміною pH з 7.0 до 8.0 призводить до експоненційного зростання токсичності [5].

Реалізація запропонованого методу дозволяє перейти від реактивного до предиктивного керування процесами водопідготовки. Інтеграція математичної моделі токсичності безпосередньо у контур керування забезпечує своєчасну активацію виконавчих механізмів ще до настання критичних умов, що мінімізує ризики загибелі гідробіонтів та підвищує загальну надійність системи.

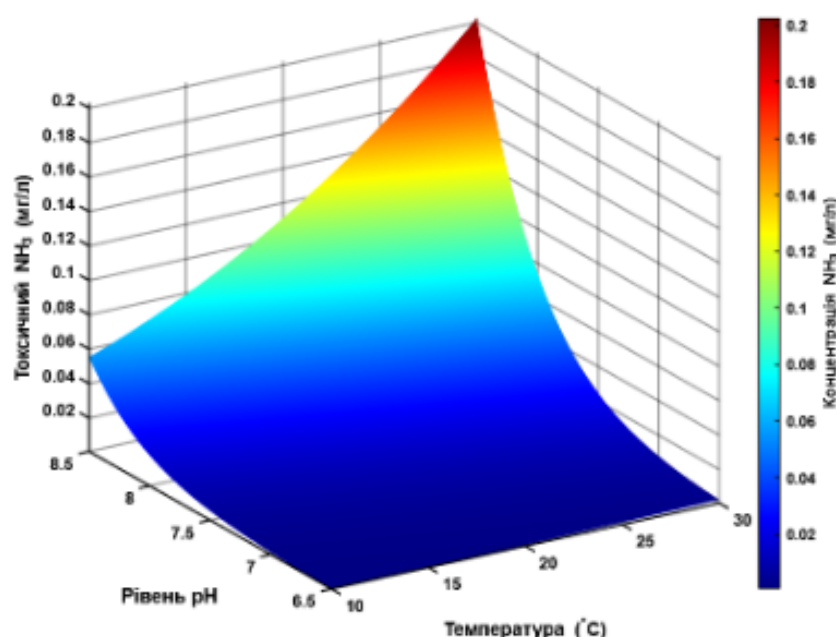


Рисунок 1. Залежність концентрації токсичного NH_3 від температури та pH

Література

1. Emerson K., Russo R. C., Lund R. E. Aqueous Ammonia Equilibrium Calculations: Effect of pH and Temperature. *Journal of the Fisheries Research Board of Canada*. 1975. Vol. 32(12). P. 2379–2383. URL: <https://cdnsiencepub.com/doi/10.1139/f75-274>.
2. Parra L., Sendra S., Garcia L., Lloret J. Design and Deployment of Low-Cost Sensors for Monitoring the Water Quality and Fish Behavior in Aquaculture Tanks during the Feeding Process. *Sensors*. 2018. Vol. 18, Iss. 3. 750. URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/18/3/750>.
3. Al-Naji A., Fadhil H., Chahl J. Water Quality Monitoring System for Fish Farming Based on IoT and Machine Learning. *Applied Sciences*. 2021. Vol. 11, Iss. 15. 6682. URL: <https://www.mdpi.com/2076-3417/11/15/6682>.
4. Chowdury M. E. H. et al. A Low-Cost IoT-Based Smart Water Quality Monitoring System. *Water*. 2019. Vol. 11, Iss. 11. 2243. URL: <https://www.mdpi.com/2073-4441/11/11/2243>.
5. Baena-Navarro R., Carriazo-Regino Y., Torres-Hoyos F., Pinedo-López J. Intelligent Prediction and Continuous Monitoring of Water Quality in Aquaculture: Integration of Machine Learning and Internet of Things for Sustainable Management. *Water*. 2025. Vol. 17, Iss. 1. 82. URL: <https://www.mdpi.com/2073-4441/17/1/82>.

Додаток Б

Лістинг програми

```
#include "main.h"
#include "drivers/ds18b20.h"
#include "drivers/sx1278.h"
ADC_HandleTypeDef hadc1;
SPI_HandleTypeDef hspi1;
volatile uint16_t adc_dma_buffer[3];
SystemState_t current_state = {0};
float Math_FilterEMA(float input, float prev_output) {
    return (EMA_ALPHA * input) + ((1.0f - EMA_ALPHA) * prev_output);
}
float Math_CalculateToxicNH3(float tan, float temp, float ph) {
    float temp_k = temp + 273.15f;
    float pKa = 0.09018f + (2729.92f / temp_k);
    float denominator = 1.0f + powf(10.0f, pKa - ph);
    return tan / denominator;
}
float Math_TDSCompensate(float raw_tds, float temp) {
    float compensation_factor = 1.0f + 0.02f * (temp - 25.0f);
    return raw_tds / compensation_factor;
}
void Sensors_ReadAll(void) {
    float raw_temp = DS18B20_GetTemp();
    current_state.temperature = Math_FilterEMA(raw_temp,
current_state.temperature);
    float nh3_volts = (adc_dma_buffer[0] * 3.3f) / 4096.0f;
    float tds_raw = (adc_dma_buffer[1] * 3.3f) / 4096.0f;

    current_state.ammonia_total = nh3_volts * 10.0f;

    current_state.ammonia_toxic = Math_CalculateToxicNH3(
        current_state.ammonia_total,
        current_state.temperature,
        current_state.ph_level
    );
    current_state.tds_value = (uint16_t)Math_TDSCompensate(tds_raw
* 500.0f, current_state.temperature);
}
void Control_ExecuteLogic(SystemState_t *state) {
    uint8_t flags = 0;

    if (state->temperature <= (TEMP_SETPOINT - TEMP_HYSTERESIS)) {
        HAL_GPIO_WritePin(RELAY_HEATER_PORT, RELAY_HEATER_PIN,
GPIO_PIN_SET);
        flags |= (1 << 0);
    }
    else if (state->temperature >= (TEMP_SETPOINT +
TEMP_HYSTERESIS)) {
        HAL_GPIO_WritePin(RELAY_HEATER_PORT, RELAY_HEATER_PIN,
GPIO_PIN_RESET);
    }
}
```

```

    }

    if (state->ammonia_toxic > MAX_TOXIC_NH3) {
        HAL_GPIO_WritePin(RELAY_PUMP_CHG_PORT, RELAY_PUMP_CHG_PIN,
GPIO_PIN_SET);
        flags |= (1 << 1);
    } else {
        HAL_GPIO_WritePin(RELAY_PUMP_CHG_PORT, RELAY_PUMP_CHG_PIN,
GPIO_PIN_RESET);
    }
    if (state->ph_level < MIN_PH_LEVEL) {
        HAL_GPIO_WritePin(RELAY_DOSE_PH_PORT, RELAY_DOSE_PH_PIN,
GPIO_PIN_SET);
        flags |= (1 << 2);
    } else {
        HAL_GPIO_WritePin(RELAY_DOSE_PH_PORT, RELAY_DOSE_PH_PIN,
GPIO_PIN_RESET);
    }
    state->relay_flags = flags;
}

void Telemetry_SendLoRa(SystemState_t *state) {
    LoRa_Packet_t packet;
    packet.device_id = 0x01;
    packet.temp_x100 = (int16_t)(state->temperature * 100.0f);
    packet.nh3_x1000 = (uint16_t)(state->ammonia_toxic * 1000.0f);
    packet.tds = state->tds_value;
    packet.ph_x10 = (uint8_t)(state->ph_level * 10.0f);
    packet.relays = state->relay_flags;
    packet.error_code = 0;
    SX1278_Transmit((uint8_t*)&packet, sizeof(packet));
}

int main(void) {
    HAL_Init();
    SystemClock_Config();

    MX_GPIO_Init();
    MX_DMA_Init();
    MX_ADC1_Init();
    MX_SPI1_Init();
    MX_USART1_UART_Init();

    HAL_ADC_Start_DMA(&hadc1, (uint32_t*)adc_dma_buffer, 3);
    SX1278_Init();

    while (1) {
        Sensors_ReadAll();
        Control_ExecuteLogic(&current_state);
        Telemetry_SendLoRa(&current_state);
        HAL_Delay(1000);
    }
}

```