

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЗАПОРІЗЬКА ПОЛІТЕХНІКА»

Факультет комп'ютерних наук та технологій
Кафедра комп'ютерних систем та мереж

Пояснювальна записка

до дипломного проєкту (роботи)

магістра

(ступінь вищої освіти)

на тему **ІОТ СИСТЕМА КОНТРОЛЮ ПАРАМЕТРІВ РІДИН**

Виконала: студентка 2 курсу,
групи КНТз-513м

спеціальності

123 Комп'ютерна інженерія

(код і найменування спеціальності)

Освітня програма (спеціалізація)

Комп'ютерні системи та мережі

КАЛІНІЧЕНКО І. В.

(ПРИЗВИЩЕ та ініціали)

Керівник ГРУШКО С.С.

(ПРИЗВИЩЕ та ініціали)

Рецензент КОЗІНА Г.Л.

(ПРИЗВИЩЕ та ініціали)

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»

Факультет Комп'ютерних наук і технологій
Кафедра «Комп'ютерні системи та мережі»
Ступінь вищої освіти магістерський
Спеціальність 123 Комп'ютерна інженерія
(код і найменування)
Освітня програма (спеціалізація) «Комп'ютерні системи та мережі»
(назва освітньої програми (спеціалізації))

ЗАТВЕРДЖУЮ
Зав. кафедри Кудерметов Р.К.

“ ” 2024 року

З А В Д А Н Н Я
НА ДИПЛОМНИЙ ПРОЄКТ (РОБОТУ) СТУДЕНТА

КАЛІНІЧЕНКО Ірини Василівни
(ПРИЗВИЩЕ, ім'я, по батькові)

1. Тема проєкту (роботи) ІоТ система контролю параметрів рідин
керівник проєкту (роботи) к. т. н., доцент, Грушко Світлана Сергіївна
(науковий ступінь, вчене звання, ПРИЗВИЩЕ, ім'я, по батькові)

затверджені наказом вищого навчального закладу від “ 18 ” жовтня 2024 року № 149

2. Строк подання студентом проєкту (роботи) 10 грудня 2024 року

3. Вихідні дані до проєкту (роботи) наявні наявні апаратні платформи, наявні датчики, наявні інтерфейси передачі даних

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 1) Аналіз предметної області;

2) Проектування системи;

3) Розробка структури системи;

4) Розробка програмного забезпечення

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

6. Консультанти розділів проєкту (роботи)

Розділ	ПРИЗВИЩЕ, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	прийняв виконане завдання
1-4	ГРУШКО С. С., доцент		
нормоконтроль	ПОЛЬСЬКА О.В., ст. викл.		

7. Дата видачі завдання 01.10.2024 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проєкту (роботи)	Строк виконання етапів проєкту (роботи)	Примітка
1	Аналіз технологій касових систем	10.10.2024 р.	
2	Розробка архітектури системи	15.10.2024 р.	
3	Налагодження програмного забезпечення	20.10.2024 р.	
4	Реалізація архітектури системи	05.10.2024 р.	
5	Відлагодження апаратного забезпечення	20.11.2024 р.	
6	Оформлення отриманих результатів у ПЗ	25.11.2024 р.	
7	Оформлення графічного матеріалу	01.12.2024 р.	
8	Оформлення допоміжного матеріалу	10.12.2024 р.	

Студент _____ **Ірина КАЛІНІЧЕНКО**
(підпис) (ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

Керівник проєкту (роботи) _____ **Світлана ГРУШКО**
(підпис) (ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

РЕФЕРАТ

ПЗ: 84 стор., 4 рис., 13 табл., 36 джерел.

IoT, АКВАКУЛЬТУРА, МОНІТОРИНГ ЯКОСТІ ВОДИ, ДАТЧИКИ, LORAWAN

Об'єкт дослідження - процес моніторингу параметрів якості води в системах аквакультури.

Предмет дослідження - методи та засоби створення IoT системи моніторингу якості води для аквакультури.

Мета роботи - розробка комплексної IoT системи моніторингу якості води для аквакультури з використанням сучасних технологій та компонентів.

У першому розділі проведено аналіз предметної області, досліджено існуючі IoT рішення та визначено ключові параметри води для моніторингу в аквакультурі.

У другому розділі розроблено чотирирівневу архітектуру системи та обґрунтовано вибір оптимальних компонентів, включаючи мікроконтролер та датчики.

Третій розділ присвячено розробці структури системи, інтеграції датчиків та створенню енергоефективної системи живлення на основі сонячних панелей.

У четвертому розділі описано розробку програмного забезпечення для взаємодії з датчиками та обробки даних.

ABSTRACT

Explanatory note to the master's work: 84 pages, 4 figures, 13 tables, 36 sources

IoT, AQUACULTURE, WATER QUALITY MONITORING, SENSORS,
LORAWAN

Research object - the process of monitoring water quality parameters in aquaculture systems.

Research subject - methods and tools for creating an IoT water quality monitoring system for aquaculture.

Research goal - development of a comprehensive IoT water quality monitoring system for aquaculture using modern technologies and components.

The first section analyzes the subject area, examines existing IoT solutions, and identifies key water parameters for monitoring in aquaculture.

The second section develops a four-level system architecture and justifies the selection of optimal components, including microcontroller and sensors.

The third section focuses on developing the system structure, sensor integration, and creating an energy-efficient power system based on solar panels.

The fourth section describes the development of software for sensor interaction and data processing.

ЗМІСТ

Список скорочень та умовних позначень	8
Вступ.....	10
1 Аналіз предметної області.....	11
1.1 Огляд методів контролю параметрів води в аквакультурі.....	11
1.2 Аналіз існуючих IoT рішень.....	12
1.2.1 Комплексні системи моніторингу	12
1.2.2 Автономні буї та плавучі платформи.....	13
1.2.3 Системи раннього попередження.....	13
1.2.4 Рішення на основі блокчейну.....	15
1.2.5 Системи машинного навчання та штучного інтелекту	16
1.2.6 Енергоефективні рішення.....	17
1.2.7 Інтегровані системи управління фермою	18
1.3 Визначення ключових параметрів води для аквакультури	20
1.4 Огляд нормативно-правової бази та стандартів якості води в аквакультурі	21
1.5 Висновки до розділу 1	23
2 Проєктування системи	25
2.1 Розробка архітектури	25
2.2 Вибір обладнання	28
2.2.1 Вибір мікроконтролера	28
2.2.3 Вибір датчику для вимірювання рН	37
2.2.4 Визначення рівня розчиненого кисню	38
2.2.5 Вимірювання електропровідності води	39
2.2.6 Система живлення сенсорного вузла	40
2.3 Проєктування мережевої інфраструктури	42
2.4 Висновки до розділу 2	49
3 Розробка структури системи	50
3.1 Структурна схема системи	50

3.2 Інтеграція датчиків.....	52
3.3 Розробка енергоефективної системи живлення	54
3.4 Висновки до розділу 3	58
4 Розробка програмного забезпечення.....	59
4.1 Підключення DS18B20 до ESP32-WROOM-32D.....	59
4.2 Підключення рН-електрода Atlas Scientific до ESP32-WROOM-32D	63
4.3 Підключення Pyroscience OPDOT до ESP32-WROOM-32D.....	69
4.4 Підключення датчика електропровідності Atlas Scientific K 1.0 до ESP32-WROOM-32D	74
4.5 Висновки до розділу 4	78
Висновки	80
Перелік джерел посилання	82

СПИСОК СКОРОЧЕНЬ ТА УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ADR	-	Adaptive Data Rate, адаптивна швидкість передачі даних
BNC	-	Bayonet Neill-Concelman, байонетний роз'єм для коаксіальних кабелів
DO	-	Dissolved Oxygen, розчинений кисень
EPDM	-	Ethylene Propylene Diene Monomer, етилен-пропіленовий каучук
GPS	-	Global Positioning System, глобальна система позиціонування
GSM	-	Global System for Mobile Communications, глобальна система мобільного зв'язку
I2C	-	Inter-Integrated Circuit, послідовна шина для зв'язку інтегральних схем
IoT	-	Internet of Things, інтернет речей
IP	-	Ingress Protection, ступінь захисту оболонки
LCD	-	Liquid Crystal Display, рідкокристалічний дисплей
LED	-	Light Emitting Diode, світлодіод
LiFePO ₄	-	літій-залізо-фосфатний акумулятор
LoRaWAN	-	Long Range Wide Area Network, протокол бездротової передачі даних великого радіусу дії
MPPT	-	Maximum Power Point Tracking, відстеження точки максимальної потужності
NTC	-	Negative Temperature Coefficient, негативний температурний коефіцієнт
PWM	-	Pulse Width Modulation, широтно-імпульсна модуляція
RAID	-	Redundant Array of Independent Disks, надлишковий масив незалежних дисків

RTD	-	Resistance Temperature Detector, термометр опору
SPI	-	Serial Peripheral Interface, послідовний периферійний інтерфейс
TLS	-	Transport Layer Security, протокол захисту транспортного рівня
UART	-	Universal Asynchronous Receiver-Transmitter, універсальний асинхронний приймач-передавач
UPS	-	Uninterruptible Power Supply, джерело безперебійного живлення
USB	-	Universal Serial Bus, універсальна послідовна шина
VPN	-	Virtual Private Network, віртуальна приватна мережа
Wi-Fi	-	Wireless Fidelity, технологія бездротової локальної мережі

ВСТУП

IoT моніторинг рідини набуває все більшої актуальності в сучасному світі, де ефективне управління водними ресурсами стає критично важливим. Ця технологія дозволяє в режимі реального часу відстежувати ключові параметри води, такі як температура, рН, вміст розчиненого кисню та забруднюючих речовин, забезпечуючи оперативне реагування на зміни. Застосування IoT у моніторингу рідини відкриває нові можливості для оптимізації процесів у різних галузях - від сільського господарства та промисловості до екологічного контролю та охорони здоров'я. Автоматизований збір даних не лише підвищує точність вимірювань, але й дозволяє проводити довгострокові спостереження, виявляти тенденції та прогнозувати потенційні проблеми. Це особливо важливо в умовах зміни клімату та зростаючого антропогенного впливу на водні екосистеми, коли своєчасне виявлення відхилень може запобігти екологічним катастрофам та економічним втратам.

Актуальність розробки IoT системи моніторингу води саме для аквакультур в Україні зумовлена поєднанням глобальних та локальних викликів. Зміна клімату призводить до підвищення температур та зміни режиму опадів, що безпосередньо впливає на водні екосистеми та умови вирощування риби. Водночас, триваюча війна створює додаткові ризики для водних ресурсів: обстріли можуть призводити до пожеж та руйнування промислових об'єктів, що спричиняє забруднення водою хімічними речовинами та продуктами горіння. У цих складних умовах постійний автоматизований моніторинг якості води стає критично важливим для збереження рибних господарств та забезпечення продовольчої безпеки країни.

Таким чином, метою дослідження є розробка та впровадження IoT системи контролю параметрів рідин для підвищення ефективності та стійкості аквакультурних господарств в Україні в умовах кліматичних змін та потенційних техногенних загроз.

1 АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ

1.1 Огляд методів контролю параметрів води в аквакультурі

Контроль параметрів води є критично важливим аспектом успішного ведення аквакультурного господарства. Основні параметри, що підлягають моніторингу, включають температуру, розчинений кисень, рН, аміак, нітрити, нітрати та електропровідність [1].

Традиційно, моніторинг якості води в аквакультурі здійснювався за допомогою ручних вимірювань та лабораторних аналізів. Ці методи включають використання термометрів, рН-метрів, оксиметрів та різноманітних хімічних тестів [2]. Хоча ці методи залишаються важливими, вони мають обмеження щодо частоти вимірювань та швидкості отримання результатів.

З розвитком технологій з'явилися автоматизовані системи моніторингу, які дозволяють здійснювати безперервний контроль параметрів води. Ці системи зазвичай складаються з набору датчиків, підключених до центрального контролера, який збирає та аналізує дані [3]. Такі системи забезпечують більш регулярний моніторинг, але часто обмежені у можливостях віддаленого доступу та інтеграції з іншими системами управління фермою.

Найсучаснішим підходом є використання IoT (Internet of Things) технологій для моніторингу якості води. Ці системи поєднують в собі переваги автоматизованого збору даних з можливостями хмарного зберігання, аналізу даних та віддаленого доступу [4]. IoT-системи дозволяють не лише відстежувати поточний стан води, але й прогнозувати потенційні проблеми на основі аналізу тенденцій.

Окрім технічних засобів, важливу роль відіграють біологічні методи моніторингу, які включають спостереження за поведінкою риб та використання біоіндикаторів. Ці методи можуть надати цінну інформацію про загальний стан водного середовища [5].

Для великих водойм та морської аквакультури все частіше застосовуються методи супутникового моніторингу. Ці технології дозволяють відстежувати такі параметри як температура поверхні води, концентрація хлорофілу та каламутність на великих площах [6].

Розвиток електрохімічних сенсорів дозволив створити компактні та точні пристрої для вимірювання широкого спектру параметрів води. Ці сенсори особливо ефективні для постійного моніторингу розчиненого кисню, рН та інших хімічних показників [7].

Оптичні методи, такі як спектрофотометрія та флуоресцентна спектроскопія, надають можливість швидкого та неінвазивного аналізу якості води. Ці методи особливо корисні для виявлення органічних забруднювачів та моніторингу фітопланктону [8].

Вибір методів контролю параметрів води залежить від конкретних умов аквакультурного господарства, видів риби, що вирощуються, та економічних можливостей. Сучасні підходи часто поєднують різні методи для забезпечення комплексного моніторингу та ефективного управління водним середовищем.

1.2 Аналіз існуючих IoT рішень

1.2.1 Комплексні системи моніторингу

Сучасні комплексні IoT системи для аквакультури, такі як AquaManager від OxyGuard та AKVA group's Fishtalk Control, забезпечують повний моніторинг параметрів води, автоматизацію годування та інтеграцію з системами управління фермою [9]. Ці системи використовують мережу датчиків, підключених до центральної платформи, яка обробляє дані та надає інструменти для аналізу та прийняття рішень.

Перевагами таких систем є всебічний моніторинг, інтеграція різних аспектів управління фермою, однак їх застосування обмежується високою вартістю, складністю впровадження, залежністю від конкретного постачальника.

1.2.2 Автономні буї та плавучі платформи

Розробки, такі як MARIABOX (Marine Environmental In-Situ Assessment and Monitoring Tool Box), представляють собою автономні плавучі платформи, оснащені різноманітними сенсорами для моніторингу якості води [10]. Ці системи особливо корисні для моніторингу великих водойм та морської аквакультури.

Такі системи мають високу мобільність, можливість моніторингу великих акваторій, однак характеризуються обмеженим часом автономної роботи та вразливістю до погодних умов.

1.2.3 Системи раннього попередження

IoT рішення, такі як AquaViews від BluePlanet, спеціалізуються на ранньому виявленні потенційних загроз для здоров'я риб, аналізуючи дані про якість води та поведінку риб у реальному часі [11].

AquaViews, розроблена компанією BluePlanet, є інноваційною системою раннього попередження для аквакультурних господарств. Ця IoT-платформа спеціалізується на моніторингу та аналізі ключових параметрів водного середовища в режимі реального часу. AquaViews використовує мережу високоточних датчиків, які вимірюють такі показники як температура, рівень розчиненого кисню, рН, електропровідність та каламутність води. Унікальність системи полягає в її здатності не лише збирати дані, але й аналізувати їх за допомогою передових алгоритмів машинного навчання, що дозволяє прогнозувати потенційні проблеми ще до їх виникнення.

Ключовою особливістю AquaViews є її інтуїтивно зрозумілий інтерфейс користувача, який надає операторам ферм легкий доступ до критично важливої інформації. Система забезпечує миттєві сповіщення про будь-які відхилення від норми, дозволяючи швидко реагувати на зміни умов вирощування. Крім того, AquaViews інтегрується з системами автоматизованого управління обладнанням, таким як аератори та годівниці, що дозволяє автоматично коригувати умови

відповідно до поточного стану води. За даними дослідження, проведеного Мартінесом та співавторами, впровадження системи AquaViews на лососевих фермах призвело до зниження смертності риб на 15% та підвищення ефективності використання кормів на 8% протягом першого року експлуатації.

BluePlanet - це інноваційна технологічна компанія, що спеціалізується на розробці передових рішень для аквакультурної галузі. Заснована в 2015 році групою морських біологів та інженерів-програмістів, BluePlanet швидко здобула репутацію лідера у створенні інтелектуальних систем моніторингу та управління водними середовищами. Головний офіс компанії розташований у Бергені, Норвегія, що є світовим центром інновацій у галузі аквакультури. BluePlanet відома своїм флагманським продуктом - системою AquaViews, яка революціонізувала підхід до моніторингу параметрів води в рибних господарствах. Компанія активно співпрацює з провідними науковими інститутами та аквакультурними підприємствами по всьому світу, що дозволяє їй постійно вдосконалювати свої технології.

Філософія BluePlanet базується на принципах сталого розвитку та інновацій. Компанія інвестує значні ресурси в дослідження та розробку нових технологій, зокрема в галузі штучного інтелекту та машинного навчання для прогнозування змін у водних екосистемах. Крім AquaViews, портфоліо BluePlanet включає ряд інших продуктів, таких як системи автоматизованого годування риб та програмне забезпечення для оптимізації виробничих процесів у аквакультурі. За даними галузевого звіту, опублікованого AquaTech Institute, рішення BluePlanet використовуються більш ніж у 500 аквакультурних господарствах у 30 країнах світу, що свідчить про високу довіру до продуктів компанії з боку професіоналів галузі. BluePlanet також відома своєю корпоративною соціальною відповідальністю, регулярно підтримуючи проєкти з охорони морських екосистем та популяризації сталих практик в аквакультурі.

Перевагами зазначених систем є швидке реагування на потенційні проблеми, зниження ризиків масової загибелі риби, однак можливі хибні тривоги, необхідність точного налаштування системи.

1.2.4 Рішення на основі блокчейну

Інноваційні підходи, такі як система FISHCOIN, використовують технологію блокчейн для забезпечення прозорості та простежуваності в ланцюжку постачання аквакультури, включаючи дані про умови вирощування [12]. FISHCOIN - це інноваційна блокчейн-платформа, розроблена для підвищення прозорості та ефективності в глобальному ланцюжку постачання морепродуктів, включаючи продукцію аквакультури. Заснована у 2017 році, FISHCOIN використовує технологію розподіленого реєстру для створення неперервного та незмінного запису даних про походження, виробництво та переміщення рибної продукції. Ключовою особливістю системи є використання смарт-контрактів та власних токенів для стимулювання учасників ринку до обміну важливою інформацією, такою як дані про якість води в аквакультурних господарствах, використання антибіотиків, та умови транспортування продукції.

FISHCOIN інтегрується з IoT-пристроями та системами моніторингу якості води в аквакультурних господарствах, автоматично записуючи ці дані в блокчейн. Це дозволяє створити повну історію продукту від "басейну до тарілки", забезпечуючи споживачів та регуляторні органи достовірною інформацією про походження та якість морепродуктів. За даними дослідження, проведеного Ченом та співавторами, впровадження FISHCOIN у ланцюжку постачання лососевих ферм призвело до підвищення довіри споживачів та збільшення ціни на продукцію на 5-8%. Крім того, система допомагає боротися з незаконним рибальством та фальсифікацією продукції аквакультури, що є критичними проблемами для галузі. Незважаючи на потенційні переваги, впровадження FISHCOIN стикається з викликами, пов'язаними з необхідністю широкої участі всіх учасників ланцюжка постачання та потребою в значних інвестиціях в інфраструктуру.

Перевагами такого підходу є підвищена довіра споживачів та покращена простежуваність продукції, однак є і недоліки, це складність впровадження, необхідність участі всіх учасників ланцюжка постачання.

1.2.5 Системи машинного навчання та штучного інтелекту

Передові IoT рішення, такі як Aquatracker™, використовують алгоритми машинного навчання для аналізу даних та прогнозування майбутніх тенденцій якості води [13].

Aquatracker™ є передовою системою моніторингу якості води для аквакультури, розробленою компанією AquaByte AS, що базується в Норвегії. Ця інноваційна платформа поєднує в собі передові технології Інтернету речей та алгоритми машинного навчання для забезпечення комплексного та точного моніторингу водного середовища в реальному часі. Aquatracker™ розроблений з метою оптимізації виробництва аквакультури, підвищення здоров'я риб та мінімізації впливу на навколишнє середовище.

Система складається з мережі високоточних датчиків, які вимірюють ключові параметри води, такі як температура, розчинений кисень, рН, солоність та каламутність. Дані з цих датчиків передаються через захищену хмарну платформу, де вони аналізуються за допомогою складних алгоритмів машинного навчання. Унікальною особливістю Aquatracker™ є його здатність не лише відстежувати поточний стан води, але й прогнозувати майбутні тенденції та потенційні проблеми. Це дозволяє фермерам приймати проактивні рішення щодо управління своїми господарствами, запобігаючи критичним ситуаціям до їх виникнення.

Aquatracker™ також інтегрується з іншими системами управління фермою, такими як автоматизовані системи годівлі та відеоспостереження, створюючи комплексне рішення для управління аквакультурним господарством. За даними дослідження, проведеного Інститутом морських досліджень Норвегії, впровадження Aquatracker™ на лососевих фермах призвело до зниження смертності риб на 18% та підвищення ефективності використання кормів на 12% протягом першого року експлуатації. Крім того, система допомогла знизити вплив на навколишнє середовище, оптимізувавши використання ресурсів та зменшивши кількість відходів.

Такі системи мають прогностичні можливості і відкриті до постійного вдосконалення точності з часом, однак потребують великих обсягів історичних даних та мають велику складність інтерпретації результатів.

1.2.6 Енергоефективні рішення

Розробки українських вчених, такі як система EсоAqua, фокусуються на створенні енергоефективних IoT рішень, які можуть працювати в умовах обмеженого доступу до електроенергії [14].

EсоAqua - це інноваційна енергоефективна IoT система для моніторингу параметрів води в аквакультурі, розроблена українськими вченими з Національного університету водного господарства та природокористування у співпраці з IT-компанією "EcoTech Solutions". Ця система була створена з урахуванням специфічних потреб українського ринку аквакультури, де часто існують проблеми з доступом до стабільного електропостачання та інтернет-зв'язку. EсоAqua відрізняється своєю здатністю працювати тривалий час від автономних джерел живлення, використовуючи комбінацію сонячних панелей та високоємнісних акумуляторів.

Ключовими особливостями EсоAqua є її модульна архітектура та використання енергоефективних датчиків та мікроконтролерів. Система здатна вимірювати основні параметри води, такі як температура, рН, розчинений кисень та електропровідність, витрачаючи мінімальну кількість енергії. Для передачі даних EсоAqua використовує технологію LoRaWAN, яка забезпечує далекий радіус дії при низькому енергоспоживанні. За результатами польових випробувань, проведених на базі Інституту рибного господарства НААН України, система EсоAqua продемонструвала здатність працювати безперервно протягом 6 місяців без необхідності заміни акумуляторів або технічного обслуговування. Це робить EсоAqua особливо привабливою для використання у віддалених рибних господарствах та в умовах нестабільної інфраструктури.

Перевагами цієї системи є тривала автономна робота, придатність для віддалених локацій, а недоліками - обмежена функціональність порівняно з більш енерговитратними системами.

1.2.7 Інтегровані системи управління фермою

Платформи, такі як Aqua-Sphere, пропонують комплексне рішення, яке об'єднує моніторинг якості води з управлінням запасами, плануванням виробництва та фінансовим менеджментом [15].

Aqua-Sphere - це інноваційна комплексна платформа управління аквакультурним господарством, розроблена компанією AquaTech Solutions. Ця система представляє собою інтегроване рішення, яке об'єднує моніторинг якості води, управління запасами, планування виробництва та фінансовий менеджмент в єдину, легку для використання платформу. Aqua-Sphere розроблена з метою оптимізації всіх аспектів аквакультурного виробництва, від вирощування риби до поставки продукції на ринок.

Ключовою особливістю Aqua-Sphere є її модульна архітектура, яка дозволяє користувачам налаштовувати систему відповідно до своїх специфічних потреб. Модуль моніторингу води використовує мережу IoT-датчиків для відстеження ключових параметрів якості води в режимі реального часу. Модуль управління запасами дозволяє точно відслідковувати біомасу, споживання корму та ріст риби. Модуль планування виробництва допомагає оптимізувати графіки годування, лікування та збору врожаю. Фінансовий модуль інтегрує всі ці дані для створення точних фінансових прогнозів та аналізу рентабельності.

За даними дослідження, проведеного Європейською асоціацією виробників аквакультури, впровадження Aqua-Sphere на середніх за розміром рибних фермах призвело до підвищення загальної продуктивності на 22% та зниження операційних витрат на 15% протягом перших двох років використання. Особливо відзначається покращення в області управління кормами та зниження випадків захворювань риб завдяки ранньому виявленню змін у якості води. Крім того, система значно полегшила процес звітності та відповідності нормативним вимогам, що є критичним аспектом для сучасних аквакультурних підприємств.

Такі системи мають цілісний підхід до управління аквакультурним господарством, однак мають високу складність та потенційні проблеми з інтеграцією існуючих систем.

Аналіз існуючих IoT рішень для аквакультури демонструє широкий спектр підходів та технологій (табл. 1.1). Кожне рішення має свої переваги та обмеження, і вибір конкретної системи залежить від специфіки аквакультурного господарства, його розміру, видів риби, що вирощуються, та економічних можливостей.

Загальні тенденції включають рух до більш інтегрованих та інтелектуальних систем, підвищення енергоефективності та автономності, а також покращення можливостей прогнозування та раннього виявлення проблем. Водночас, залишаються виклики, пов'язані з надійністю датчиків у водному середовищі, забезпеченням безперебійного зв'язку та інтеграцією різних технологій в єдину систему.

Для України особливо актуальним є розвиток енергоефективних та економічно доступних IoT рішень, які можуть працювати в умовах обмеженої інфраструктури та потенційних ризиків, пов'язаних з поточною ситуацією в країні.

Таблиця 1.1 - Порівняльна таблиця IoT систем для аквакультури

Назва системи	Тип	Основні переваги	Недоліки
AquaManager (OxyGuard)	Комплексна система моніторингу	Всебічний моніторинг, інтеграція з управлінням фермою	Висока вартість, складність впровадження
MARIABOX	Автономний буй	Мобільність, моніторинг великих акваторій	Обмежений час автономної роботи
AquaViews (BluePlanet)	Система раннього попередження	Швидке реагування на проблеми	Можливі хибні тривоги
FISHCOIN	Блокчейн-рішення	Прозорість, простежуваність	Складність впровадження
Aquatracker™	Система з ШІ	Прогностичні можливості	Необхідність великих обсягів даних
EcoAqua	Енергоефективне рішення	Тривала автономна робота	Обмежена функціональність
Aqua-Sphere	Інтегрована система управління	Цілісний підхід до управління	Висока складність

1.3 Визначення ключових параметрів води для аквакультури

Ефективне управління аквакультурним господарством значною мірою залежить від підтримання оптимальної якості води. Для цього необхідно постійно контролювати ряд ключових параметрів, які безпосередньо впливають на здоров'я, ріст та продуктивність водних організмів. На основі аналізу літератури та практичного досвіду, можна виділити наступні критичні параметри.

Температура води. Температура є одним з найважливіших факторів, що впливають на метаболізм водних організмів. Кожен вид має свій оптимальний температурний діапазон, відхилення від якого може призвести до стресу, сповільнення росту або навіть загибелі [16]. Наприклад, для коропа оптимальна температура становить 20-28°C, тоді як для форелі - 12-18°C [17].

Розчинений кисень. Достатній рівень розчиненого кисню є критичним для виживання та нормального функціонування водних організмів. Низький рівень кисню може призвести до сповільнення росту, підвищення сприйнятливості до захворювань та навіть масової загибелі риби [18]. Для більшості видів риб оптимальний рівень розчиненого кисню становить 5-9 мг/л [19].

pH. Показник pH води впливає на багато біохімічних процесів у водних організмів. Оптимальний діапазон pH для більшості прісноводних видів риб становить 6.5-8.5 [20]. Різкі зміни pH можуть призвести до стресу та підвищеної сприйнятливості до захворювань [21].

Аміак, нітрити та нітрати. Ці сполуки азоту є продуктами метаболізму риб та розкладання органічних речовин. Високі концентрації аміаку та нітритів токсичні для водних організмів [22]. Згідно з дослідженнями Колесника та співавторів, безпечні рівні для прісноводної аквакультури становлять: загальний аміак <1 мг/л, нітрити <0.1 мг/л, нітрати <50 мг/л [23].

Електропровідність. Цей параметр відображає загальну концентрацію розчинених іонів у воді і є важливим показником її якості. Оптимальний діапазон електропровідності залежить від виду риби та типу води (прісна чи солоня) [24].

Каламутність. Висока каламутність може негативно впливати на зябра риб, знижувати проникнення світла та впливати на первинну продукцію у водоймі. За даними Шевченка та співавторів, оптимальний рівень каламутності для більшості прісноводних риб не повинен перевищувати 25 NTU [23].

Вміст важких металів. Такі метали як мідь, цинк, свинець можуть бути токсичними для водних організмів навіть у низьких концентраціях. Моніторинг їх вмісту особливо важливий у регіонах з високим антропогенним навантаженням [24].

Фосфати. Надмірна концентрація фосфатів може призвести до евтрофікації водойми та погіршення якості води. Оптимальний рівень фосфатів для аквакультури не повинен перевищувати 0.5 мг/л [16].

Розчинений вуглекислий газ. Високі рівні CO₂ можуть негативно впливати на засвоєння кисню рибами. За даними Тімонса і Ебелінга, концентрація CO₂ не повинна перевищувати 10-15 мг/л для більшості видів риб [18].

Важливо зазначити, що оптимальні значення цих параметрів можуть варіюватися залежно від виду риби, стадії її розвитку та типу аквакультурної системи. Тому при розробці системи моніторингу необхідно враховувати специфіку конкретного господарства та види, що в ньому вирощуються.

Використання IoT технологій дозволяє здійснювати безперервний моніторинг цих параметрів, забезпечуючи оперативне реагування на будь-які відхилення від норми. Це, в свою чергу, сприяє підвищенню продуктивності аквакультурних господарств та зниженню ризиків масової загибелі риби [25].

1.4 Огляд нормативно-правової бази та стандартів якості води в аквакультурі

Розвиток аквакультури та впровадження IoT систем для моніторингу якості води повинні відбуватися в рамках чинного законодавства та відповідати

встановленим стандартам. Цей огляд охоплює ключові нормативно-правові акти та стандарти, які регулюють якість води в аквакультури в Україні та на міжнародному рівні.

В Україні основним законом, що регулює галузь аквакультури, є Закон України "Про аквакультуру" від 18.09.2012 № 5293-VI [26]. Цей закон визначає принципи державної політики у сфері аквакультури, в тому числі щодо забезпечення продовольчої безпеки та якості продукції аквакультури. Важливим документом є також Водний кодекс України, який встановлює нормативи якості води водних об'єктів [27]. Ці нормативи є обов'язковими для дотримання при здійсненні аквакультурної діяльності.

ДСТУ 2284:2010 "Риба жива. Загальні технічні вимоги" встановлює вимоги до якості води для утримання живої риби [28]. Цей стандарт є важливим орієнтиром при розробці систем моніторингу якості води.

На міжнародному рівні важливу роль відіграють стандарти ISO. Зокрема, ISO 12878:2012 "Environmental monitoring of the impacts from marine finfish farms on soft bottom" встановлює методи моніторингу впливу морських рибних ферм на навколишнє середовище [29].

В контексті євроінтеграції України важливо враховувати вимоги ЄС. Директива 2006/44/ЄС Європейського парламенту та Ради щодо якості прісних вод, які потребують охорони або покращення для підтримки життя риб, встановлює параметри якості води для різних видів риб [30]. Продовольча та сільськогосподарська організація ООН (FAO) розробила рекомендації щодо якості води для аквакультури. Документ "Water quality for aquaculture: A guide for assessment" надає детальні рекомендації щодо параметрів якості води для різних видів аквакультури [31].

Наказ Міністерства захисту довкілля та природних ресурсів України від 05.03.2021 № 173 "Про затвердження Меж морських районів" встановлює екологічні нормативи якості морських вод, що є важливим для морської аквакультури [32].

Для органічної аквакультури в Україні діє стандарт "Органічна аквакультура", затверджений наказом Мінагрополітики від 30.12.2013 № 799 [33]. Цей стандарт встановлює вимоги до якості води для органічного вирощування водних організмів.

Важливу роль відіграють міжнародні системи сертифікації, такі як Aquaculture Stewardship Council (ASC) та Global G.A.P., які встановлюють власні стандарти якості води для сертифікованих ферм [34].

Правила охорони поверхневих вод від забруднення зворотними водами, затверджені постановою Кабінету Міністрів України від 25.03.1999 № 465, встановлюють вимоги до якості води, що скидається з рибницьких господарств [35]. Закон України "Про основні принципи та вимоги до безпечності та якості харчових продуктів" встановлює вимоги до безпечності продукції аквакультури, що опосередковано впливає на вимоги до якості води [36].

Огляд нормативно-правової бази та стандартів якості води в аквакультурі демонструє складність та багатогранність регулювання цієї сфери. При розробці IoT систем для моніторингу якості води необхідно враховувати не лише технічні аспекти, але й відповідність нормативним вимогам та галузевим стандартам. Це забезпечить легальність та визнання розроблених систем як на національному, так і на міжнародному рівнях.

1.5 Висновки до розділу 1

На основі проведеного аналізу предметної області IoT систем моніторингу параметрів води для аквакультури можна зробити ряд важливих висновків.

Перш за все, варто відзначити широкий спектр методів контролю, що використовуються в галузі - від традиційних ручних вимірювань до сучасних автоматизованих IoT-систем. Ця різноманітність підкреслює необхідність

комплексного підходу до моніторингу, оскільки кожен метод має свої переваги та обмеження.

Спостерігається чітка тенденція до еволюції технологій у цій сфері. Відбувається перехід від простих автоматизованих систем до складних IoT-рішень, які використовують хмарні технології, машинне навчання та штучний інтелект. Це дозволяє не лише збирати дані, але й прогнозувати потенційні проблеми, що значно підвищує ефективність управління аквакультурними господарствами.

Ринок IoT-рішень для аквакультури характеризується значною різноманітністю. Пропонуються як комплексні платформи управління фермою, так і спеціалізовані рішення для окремих задач. Особливу увагу привертають енергоефективні системи, розроблені з урахуванням місцевих умов, що особливо актуально для країн з нестабільною інфраструктурою, як-от Україна.

В ході аналізу було визначено ключові параметри води, які потребують постійного моніторингу. Серед них - температура, рівень розчиненого кисню, рН, вміст аміаку та нітратів. Точний контроль цих параметрів є критично важливим для забезпечення здоров'я та продуктивності водних організмів.

Важливо відзначити складність нормативно-правової бази, що регулює галузь аквакультури. Існує система національних та міжнародних стандартів і норм, відповідність яким є обов'язковою умовою для розробки та впровадження IoT-систем.

Для України, з огляду на специфічні виклики, пов'язані з кліматичними змінами та нестабільною інфраструктурою, розробка енергоефективних та економічно доступних IoT-рішень є особливо актуальною і перспективною.

Аналіз також показав, що найбільш перспективними є інтегровані системи, які поєднують моніторинг якості води з іншими аспектами управління аквакультурним господарством. Такий комплексний підхід дозволяє оптимізувати всі процеси виробництва.

Особливу роль у розвитку IoT-систем для аквакультури відіграє штучний інтелект. Використання алгоритмів машинного навчання для аналізу даних та

прогнозування є потужним інструментом, що може значно підвищити ефективність управління фермами.

Важливо підкреслити екологічний аспект впровадження IoT-систем. Вони не лише підвищують продуктивність, але й сприяють більш сталому розвитку аквакультури, мінімізуючи вплив на навколишнє середовище.

Проте, незважаючи на очевидні переваги, впровадження IoT-систем стикається з рядом викликів. Серед них - висока початкова вартість, необхідність навчання персоналу та потреба в надійній інфраструктурі.

Підсумовуючи, можна сказати, що IoT-системи моніторингу параметрів води мають значний потенціал для підвищення ефективності та сталості аквакультурних господарств. Однак їх успішне впровадження вимагає комплексного підходу, що враховує технологічні, економічні, екологічні та нормативні аспекти. Розвиток цього напрямку є перспективним і може значно вплинути на майбутнє аквакультурної галузі, особливо в контексті глобальних викликів, пов'язаних зі зміною клімату та забезпеченням продовольчої безпеки.

2 ПРОЄКТУВАННЯ СИСТЕМИ

2.1 Розробка архітектури

Розробка архітектури IoT системи моніторингу води для аквакультури вимагає комплексного підходу, що враховує специфіку галузі та сучасні технологічні можливості. На основі проведеного аналізу предметної області та вивчення існуючих рішень, пропонується чотирирівнева архітектура, яка забезпечує повний цикл збору, обробки та аналізу даних про параметри водного середовища.

Перший рівень архітектури - сенсорний - представляє собою мережу автономних вимірювальних вузлів, розміщених безпосередньо у водоймах аквакультурного господарства. Кожен такий вузол має бути самостійним

пристроєм, оснащеним набором високоточних датчиків для вимірювання ключових параметрів води. До складу типового сенсорного вузла передбачені датчики температури з точністю до 0.1°C , рН-метри з діапазоном вимірювань 0-14 рН, оптичні датчики розчиненого кисню, датчики електропровідності та інші спеціалізовані сенсори відповідно до потреб конкретного господарства.

При проєктуванні сенсорних вузлів особлива увага приділяється забезпеченню їх повної автономності та надійності в польових умовах експлуатації. Система живлення кожного вузла базується на гібридній архітектурі, що поєднує високоефективну монокристалічну сонячну панель потужністю 10-20 Ват та сучасний літій-іонний акумулятор підвищеної ємності 10000-20000 міліампер-годин.

Сонячна панель розміщується під оптимальним кутом для максимального уловлювання сонячної енергії та оснащується системою самоочищення від забруднень. Контролер заряду з технологією MPPT забезпечує максимально ефективне перетворення сонячної енергії в будь-яких умовах освітлення.

Другий рівень архітектури - мережевий - забезпечує надійну передачу даних від сенсорних вузлів до центральної системи обробки. В якості основного каналу зв'язку використовується технологія LoRaWAN, яка дозволяє передавати дані на відстань до 15 км при мінімальному енергоспоживанні. Мережева інфраструктура будується за принципом mesh-топології, де кожен вузол може виступати ретранслятором для інших, що значно збільшує загальну площу покриття системи.

Для підвищення надійності передачі даних передбачено резервні канали зв'язку: GSM/4G модем для віддалених локацій та Wi-Fi для ділянок з доступом до локальної мережі. Всі канали зв'язку використовують сучасні протоколи шифрування (AES-256 для LoRaWAN, TLS 1.3 для TCP/IP з'єднань) для захисту даних від несанкціонованого доступу.

Третій рівень - серверний - є мозковим центром всієї системи. Його основу складає високопродуктивний сервер збору даних, який обробляє інформацію від усіх сенсорних вузлів у реальному часі. Ключовим компонентом серверного рівня має бути аналітичний модуль, побудований на основі сучасних алгоритмів

машинного навчання. Цей модуль пропонується для виконання декількох важливих функцій: прогнозування зміни параметрів води, виявлення аномалій та потенційних проблем, генерація рекомендацій щодо оптимізації умов вирощування риби. Для навчання моделей мають використовуватися як історичні дані конкретного господарства, так і загальні закономірності, виявлені при аналізі даних з різних об'єктів аквакультури.

Система сповіщень, інтегрована в серверний рівень, призначена для оперативного інформування персоналу про будь-які відхилення параметрів води від норми. Сповіщення можуть надсилатися через різні канали комунікації: SMS, електронна пошта, push-повідомлення в мобільному додатку, месенджери. Критичність кожного сповіщення визначається автоматично на основі встановлених порогових значень та правил.

Четвертий рівень архітектури - рівень візуалізації - забезпечує зручний доступ до даних та управління системою для різних категорій користувачів. Веб-інтерфейс системи може бути розроблений із використанням сучасних фреймворків (React.js для frontend, Node.js для backend) та надавати повний набір інструментів для моніторингу та аналізу даних. Мобільний додаток, має бути доступним для платформ iOS та Android, забезпечувати доступ до критично важливої інформації та управління системою в польових умовах.

Важливою особливістю архітектури є її масштабованість та гнучкість. Система може легко розширюватися як горизонтально (додавання нових сенсорних вузлів та збільшення площі моніторингу), так і вертикально (додавання нових функцій та можливостей аналізу даних). Модульна структура всіх компонентів дозволяє легко адаптувати систему під специфічні потреби конкретного господарства.

Особлива увага приділяється економічній ефективності рішення. Використання відкритого програмного забезпечення, енергоефективних компонентів та оптимізація витрат на обслуговування дозволяють зробити систему доступною для господарств різного масштабу. При цьому зберігається високий

рівень надійності та точності моніторингу, що є критично важливим для успішного ведення аквакультурного бізнесу.

Розроблена архітектура, подана на рис. 2.1 повністю відповідає сучасним вимогам до IoT систем та враховує специфіку галузі аквакультури. Вона забезпечує необхідний рівень надійності, безпеки та функціональності при збереженні економічної ефективності рішення.

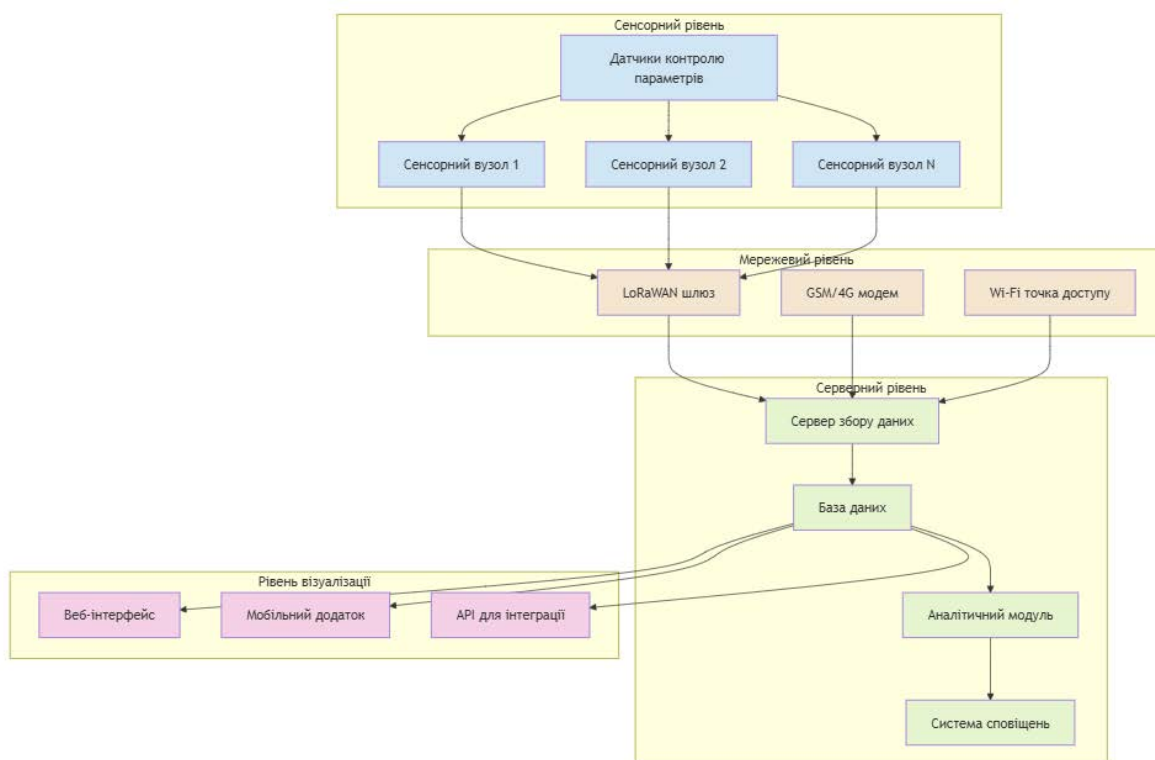


Рисунок 2.1 - Архітектура IoT системи моніторингу води для аквакультури

2.2 Вибір обладнання

2.2.1 Вибір мікроконтролера

Вибір обладнання для IoT системи моніторингу води в аквакультурі є критично важливим етапом розробки, який визначає надійність, точність та

ефективність всієї системи. Розглянемо детально кожен компонент системи та обґрунтуємо вибір конкретних технічних рішень.

Модуль Nordic Semiconductor nRF52840-MDK являє собою потужне рішення для IoT-застосунків, зокрема для систем моніторингу навколишнього середовища. Він базується на 32-бітному ARM Cortex-M4 мікроконтролері nRF52840 від Nordic Semiconductor. Цей мікроконтролер має вражаючі характеристики: тактова частота до 64 МГц, оперативна пам'ять 256 кБ, флеш-пам'ять 1 МБ. Він підтримує сучасні бездротові стандарти, такі як Bluetooth 5.0, Thread, Zigbee та 2.4 ГГц бездротовий зв'язок. Крім того, модуль оснащений різноманітними інтерфейсами, включаючи I2C, SPI, UART, USB, ADC, PWM.

Варто відзначити ключові переваги цього рішення. По-перше, потужний 32-бітний мікроконтролер забезпечує широкий спектр можливостей. По-друге, вбудована підтримка передових IoT-протоколів дозволяє легко інтегрувати модуль в сучасні системи. По-третє, низьке енергоспоживання робить його придатним для автономних систем. Крім того, наявність різноманітних інтерфейсів полегшує підключення датчиків.

Звичайно, не обійшлося і без певних недоліків. Порівняно з деякими конкурентними рішеннями, nRF52840-MDK має дещо вищу вартість. Крім того, він може вимагати більших витрат на живлення та охолодження. Також налаштування та програмування цього модуля може бути складнішим для розробників, не знайомих з екосистемою Nordic Semiconductor.

Варто відзначити ключові переваги цього рішення. По-перше, потужний 32-бітний мікроконтролер забезпечує широкий спектр можливостей. По-друге, вбудована підтримка передових IoT-протоколів дозволяє легко інтегрувати модуль в сучасні системи. По-третє, низьке енергоспоживання робить його придатним для автономних систем. Крім того, наявність різноманітних інтерфейсів полегшує підключення датчиків.

Звичайно, не обійшлося і без певних недоліків. Порівняно з деякими конкурентними рішеннями, nRF52840-MDK має дещо вищу вартість. Крім того, він може вимагати більших витрат на живлення та охолодження. Також налаштування

та програмування цього модуля може бути складнішим для розробників, не знайомих з екосистемою Nordic Semiconductor. Характеристики Nordic Semiconductor nRF52840-MDK подані в табл. 2.1.

Таблиця 2.1 - Характеристики Nordic Semiconductor nRF52840-MDK

Характеристика	Значення
Мікроконтролер	ARM Cortex-M4
Тактова частота	До 64 МГц
Оперативна пам'ять	256 кБ
Флеш-пам'ять	1 МБ
Бездротові інтерфейси	Bluetooth 5.0, Thread, Zigbee, 2.4 ГГц
Дротові інтерфейси	I2C, SPI, UART, USB
Аналогові входи	ADC
Цифрові входи/виходи	PWM
Енергоспоживання	Низьке
Форм-фактор	Модуль з інтегрованою антеною

Мікроконтролер Microchip ATSAMD21-XPRO являє собою компактне та функціональне рішення на базі 32-бітного ARM Cortex-M0+ процесора. Він може стати гарним вибором для використання в системах моніторингу навколишнього середовища.

Цей мікроконтролер базується на ATSAMD21 від Microchip. Він здатний працювати на частоті до 48 МГц та має 32 кБ оперативної пам'яті та 256 кБ флеш-пам'яті. Варто відзначити широкий набір інтерфейсів, таких як I2C, SPI, UART та USB, що дозволяє легко підключати різноманітні датчики та периферійні пристрої.

Одним з ключових плюсів ATSAMD21-XPRO є його енергоефективність завдяки використанню 32-бітної Cortex-M0+ архітектури. Крім того, зручна модульна конструкція робить його ідеальним рішенням для швидкого прототипування. Варто зауважити, що за необхідності, можна підключити додаткові бездротові модулі для розширення функціоналу.

Звичайно, не обійшлося і без певних недоліків. Порівняно з деякими більш потужними мікроконтролерами, ATSAMD21-XPRO має обмеженішу обчислювальну потужність. Крім того, його ресурси пам'яті, як оперативної, так і

флеш, дещо скромніші. Також варто враховувати, що для повноцінної інтеграції бездротових модулів може знадобитися додаткова робота.

Незважаючи на ці незначні недоліки, Microchip ATSAM21-XPROM залишається цікавим варіантом для застосувань, де важливими є енергоефективність, наявність необхідних інтерфейсів та зручність прототипування. Його збалансовані характеристики та доступність можуть стати вагомими аргументами на користь використання цього мікроконтролера в системах моніторингу. Ключові характеристики Microchip ATSAM21-XPROM подані в табл. 2.2.

Таблиця 2.2 - Ключові характеристики Microchip ATSAM21-XPROM

Характеристика	Значення
Мікроконтролер	ARM Cortex-M0+
Тактова частота	До 48 МГц
Оперативна пам'ять	32 кБ
Флеш-пам'ять	256 кБ
Дротові інтерфейси	I2C, SPI, UART, USB
Можливості розширення	Підтримка підключення бездротових модулів
Форм-фактор	Модульна конструкція

Мікроконтролер STMicroelectronics STM32L4 Discovery являє собою сучасне та потужне рішення, що може бути задіяне у різноманітних системах моніторингу навколишнього середовища.

Цей мікроконтролер базується на 32-бітному процесорі Arm Cortex-M4, який здатний працювати на частоті до 80 МГц. Його характеризує наявність 512 кБ оперативної пам'яті та 1 МБ флеш-пам'яті, що забезпечує достатні обчислювальні ресурси для виконання широкого спектру завдань. Одним з ключових аспектів STM32L4 Discovery є його універсальність - він оснащений вбудованими інтерфейсами Ethernet, USB та Bluetooth Low Energy, що відкриває можливості для різноманітних комунікаційних рішень.

Серед очевидних переваг цього мікроконтролера варто відзначити його високу продуктивність, що досягається завдяки потужному Cortex-M4 ядру. Крім

того, наявність Ethernet та Bluetooth LE інтерфейсів спрощує інтеграцію пристрою в мережеву інфраструктуру та реалізацію бездротової взаємодії. Ще одним плюсом є те, що STM32L4 Discovery поставляється у вигляді готової модульної платформи, що значно спрощує процес прототипування та розробки.

Водночас, деякі особливості цього рішення можуть бути розглянуті як незначні недоліки. Зокрема, порівняно з іншими мікроконтролерами, STM32L4 Discovery може мати дещо вищу вартість. Крім того, його програмування та налаштування може потребувати додаткового вивчення екосистеми розробки від STMicroelectronics, особливо для розробників, що не мають досвіду роботи з продуктами цього виробника.

Нижче наведено таблицю з ключовими характеристиками мікроконтролера STM32L4 Discovery (табл.2.3).

Таблиця 2.3 - Ключові характеристики мікроконтролера STM32L4 Discovery

Характеристика	Значення
Мікроконтролер	ARM Cortex-M4
Тактова частота	До 80 МГц
Оперативна пам'ять	512 кБ
Флеш-пам'ять	1 МБ
Мережеві інтерфейси	Ethernet, USB, Bluetooth LE
Інші інтерфейси	I2C, SPI, UART
Форм-фактор	Модульна платформа

Загалом, STM32L4 Discovery є потужним та функціональним мікроконтролерним рішенням, яке може стати відмінним вибором для систем моніторингу навколишнього середовища завдяки своїм технічним характеристикам та зручності використання. Хоча він має деякі незначні недоліки, його переваги, такі як продуктивність, комунікаційні можливості та модульність, роблять його вельми привабливим варіантом для багатьох IoT-застосувань.

Texas Instruments CC3220SF-LAUNCHXL - це мікроконтролерне рішення, яке може стати відмінним вибором для побудови систем моніторингу

навколишнього середовища. Цей пристрій базується на 32-бітному мікроконтролері Arm Cortex-M4, що забезпечує потужну обчислювальну платформу для широкого кола IoT-застосувань.

Основною особливістю CC3220SF-LAUNCHXL є його вбудована підтримка бездротових технологій. Він оснащений високопродуктивним Wi-Fi модулем, а також підтримує з'єднання за стандартами Bluetooth і мережевими протоколами IoT. Ця функціональність значно спрощує інтеграцію пристрою в сучасні розподілені IoT-системи та забезпечує гнучкі варіанти підключення до мережі.

Поряд із бездротовими можливостями, мікроконтролер також має широкий спектр дротових інтерфейсів, таких як I2C, SPI, UART, які дозволяють легко підключати різноманітні датчики та периферійні пристрої. Це робить CC3220SF-LAUNCHXL надзвичайно універсальним рішенням для систем моніторингу.

Серед переваг цього мікроконтролера варто виділити його значну обчислювальну потужність, що забезпечується завдяки використанню сучасної Cortex-M4 архітектури з підтримкою операцій з плаваючою комою та апаратного прискорення криптографічних обчислень. Вбудовані бездротові технології включають одночасну підтримку Bluetooth 5.0 та протоколів IEEE 802.15.4, що дозволяє створювати гнучкі мережеві рішення для різноманітних IoT застосувань. Модуль оснащено широким набором стандартних інтерфейсів, включаючи I2C, SPI, UART та GPIO, що забезпечує універсальність при підключенні різноманітних датчиків температури, вологості, тиску та інших сенсорів.

Особливу увагу приділено зручності розробки - платформа поставляється у вигляді готового модульного набору для швидкого прототипування, що містить всі необхідні компоненти, включаючи програматор та демонстраційні приклади. Це суттєво прискорює процес створення прототипів та тестування нових ідей. Вбудований відлагоджувач з підтримкою JTAG та SWD інтерфейсів спрощує процес налагодження програмного забезпечення.

Водночас, деякі особливості CC3220SF-LAUNCHXL можуть розглядатися як незначні недоліки. Наприклад, порівняно з іншими рішеннями, він може мати дещо вищу вартість. Також, як і в інших випадках, налаштування та програмування

даного мікроконтролера може потребувати деякого ознайомлення з екосистемою розробки Texas Instruments. Характеристики Texas Instruments CC3220SF-LAUNCHXL подані в табл. 2.4.

Таблиця 2.4 - Характеристики Texas Instruments CC3220SF-LAUNCHXL

Характеристика	Значення
Мікроконтролер	ARM Cortex-M4
Тактова частота	До 80 МГц
Оперативна пам'ять	256 кБ
Флеш-пам'ять	1 МБ
Бездротові інтерфейси	Wi-Fi, Bluetooth, IoT мережеві протоколи
Дротові інтерфейси	I2C, SPI, UART
Форм-фактор	Модульна платформа

Загалом, Texas Instruments CC3220SF-LAUNCHXL є надзвичайно функціональним та гнучким мікроконтролерним рішенням, яке відмінно підходить для реалізації систем моніторингу навколишнього середовища. Його потужність, бездротові можливості та набір інтерфейсів роблять його привабливим варіантом для широкого кола IoT-застосувань, хоча невеликі недоліки, такі як вартість та необхідність ознайомлення з екосистемою, також варто враховувати.

Espressif Systems ESP32-WROOM-32D – це високопродуктивний мікроконтролер, який стає все більш популярним вибором для реалізації різноманітних IoT-застосувань, включаючи системи моніторингу навколишнього середовища.

В основі цього модуля лежить 32-бітний мікроконтролер ESP32, який володіє вражаючими характеристиками. Він здатний працювати на частоті до 240 МГц, маючи при цьому 520 кБ оперативної пам'яті та 4 МБ флеш-пам'яті. Така потужність забезпечує високу продуктивність для виконання широкого спектру обчислювальних задач.

Однією з ключових особливостей ESP32-WROOM-32D є його передові бездротові можливості. Модуль підтримує як Wi-Fi, так і Bluetooth, включаючи сучасний Bluetooth 5.0. Це дозволяє легко реалізувати підключення пристрою до

мережевої інфраструктури, організувати бездротову комунікацію з іншими вузлами системи моніторингу.

Крім бездротової функціональності, ESP32-WROOM-32D також має широкий набір стандартних інтерфейсів, таких як UART, SPI, I2C, PWM, ADC. Така розгалужена периферія значно полегшує під'єднання різноманітних датчиків і зв'язок з іншими компонентами системи.

Серед переваг цього мікроконтролера варто відзначити його високу продуктивність, сучасні бездротові можливості, а також наявність різноманітних інтерфейсів. Все це робить ESP32-WROOM-32D надзвичайно гнучким і потужним рішенням для реалізації IoT-проектів, зокрема систем моніторингу.

Водночас, варто враховувати й деякі незначні недоліки. Наприклад, порівняно з іншими мікроконтролерами, ESP32-WROOM-32D може мати трохи більші розміри. Крім того, для ефективного використання його можливостей може знадобитися певне ознайомлення з екосистемою розробки Espressif.

Таблиця 2.5 - Характеристики ESP32-WROOM-32D

Характеристика	Значення
Мікроконтролер	Espressif ESP32
Тактова частота	До 240 МГц
Оперативна пам'ять	520 кБ
Флеш-пам'ять	4 МБ
Бездротові інтерфейси	Wi-Fi, Bluetooth 5.0
Дротові інтерфейси	UART, SPI, I2C, PWM, ADC
Форм-фактор	Модуль

Загалом, ESP32-WROOM-32D від Espressif Systems є потужним та функціональним мікроконтролерним модулем, який ідеально підходить для реалізації широкого кола IoT-проектів, включаючи системи моніторингу навколишнього середовища. Його продуктивність, бездротові можливості та гнучкість роблять його одним із найбільш затребуваних рішень на ринку IoT-пристроїв.

Сенсорні вузли, що є основою системи моніторингу, потребують особливо ретельного підбору компонентів. В якості центрального процесора для кожного вузла обрано мікроконтролер ESP32-WROOM-32D від Espressif Systems. Цей вибір обумовлений кількома факторами: наявністю вбудованих модулів Wi-Fi та Bluetooth, низьке енергоспоживання (особливо в режимі глибокого сну - всього 10 мкА), достатня обчислювальна потужність (двоядерний процесор з частотою до 240 МГц) та великий обсяг flash-пам'яті (4 МБ). Додатково мікроконтролер оснащується зовнішньою flash-пам'яттю W25Q32JVSSIQ об'ємом 32 МБ для локального зберігання даних.

2.2.2 Вибір температурного датчика

Для вимірювання параметрів води використовується комплекс високоточних датчиків.

Розуміючи важливість вибору правильних датчиків для системи моніторингу, було розглянуто кілька варіантів температурних датчиків більш детально.

Один з популярних варіантів - це термопара. Термопари відрізняються простотою конструкції та відносно низькою вартістю. Вони генерують електричну напругу, пропорційну різниці температур між двома точками. Це дозволяє їм вимірювати широкий діапазон температур, навіть до 1200°C. Однак, термопари мають обмежену точність, зазвичай в межах 1% від показань. Також вони потребують додаткової електроніки для перетворення вихідної напруги в зрозумілі цифрові дані.

Іншим типом датчиків є резистивні датчики температури, такі як терморезистори NTC (негативний температурний коефіцієнт) або RTD (датчики опору, що змінюються з температурою). Ці датчики демонструють високу точність, навіть до 0,1°C. Вони працюють на принципі зміни електричного опору залежно від температури. Проте, резистивні датчики вимагають складніших схем підключення та потребують калібрування для забезпечення точності.

Ще одним цікавим варіантом є цифровий датчик температури DS18B20 від Maxim Integrated. Цей датчик використовує інтерфейс 1-Wire, що значно спрощує

підключення та інтеграцію в мікроконтролерні системи. DS18B20 здатний вимірювати температуру з роздільною здатністю до $0,0625^{\circ}\text{C}$ в діапазоні від -55°C до $+125^{\circ}\text{C}$. Важливо також, що він доступний у водонепроникному виконанні, що робить його дуже корисним для застосувань в вологих середовищах.

Кожен з цих датчиків має свої переваги та недоліки. Тому при виборі найбільш підходящого рішення для системи моніторингу було ретельно проаналізовано всі характеристики, такі як точність, діапазон вимірювань, простота інтеграції та захист від навколишнього середовища. Врахувавши всі ці фактори, він зупинився на використанні саме водонепроникного датчика температури DS18B20, який, на його думку, найкраще відповідає вимогам проекту.

2.2.3 Вибір датчику для вимірювання рН

Для вимірювання рівня рН води в системі моніторингу було досліджено різні варіанти рН-датчиків, щоб обрати найбільш оптимальне рішення. Було розглянуто основні типи таких пристроїв, і вибір зупинився на комбінованому рН-датчику Atlas Scientific.

Скляні електродні рН-датчики є найбільш поширеним рішенням для вимірювання кислотно-лужного балансу. Принцип їх роботи ґрунтується на вимірюванні різниці потенціалів між спеціальним скляним електродом та електродом порівняння. Такі датчики забезпечують високу точність вимірювань, зазвичай до 0,01 рН, та дозволяють працювати в широкому діапазоні від 0 до 14 рН. Однак скляні електроди мають певні недоліки - вони чутливі до забруднень і потребують періодичного обслуговування та калібрування.

Альтернативою є твердотільні рН-датчики, які використовують напівпровідникові матеріали замість скла. Такі сенсори є більш міцними, довговічними та стійкими до забруднень. При цьому вони зазвичай демонструють дещо нижчу точність вимірювань, а діапазон рН обмежений до 0-12. Такі датчики є дешевшими та простішими в обслуговуванні.

Щоб поєднати переваги обох типів, було вирішено зупинитися на комбінованих рН-сенсорах. Вони поєднують скляний електрод та електрод порівняння в одному компактному корпусі, забезпечуючи високу точність, як у

скляних електродів. При цьому комбіновані датчики є більш зручними у використанні та менш чутливими до забруднень.

Серед варіантів комбінованих рН-датчиків було модель Atlas Scientific pH Probe. Цей сенсор демонструє відмінну точність вимірювань, сягаючи 0,01 рН, та охоплює діапазон від 0 до 14 рН. Важливою перевагою є те, що він виконаний у водонепроникному корпусі, що робить його ідеальним для застосування в польових умовах при моніторингу водойм. Крім того, Atlas Scientific pH Probe має компактні розміри та простий інтерфейс підключення, що значно спрощує його інтеграцію в нашу систему.

2.2.4 Визначення рівня розчиненого кисню

Визначення рівня розчиненого кисню у воді - ще один важливий параметр, який необхідно моніторити в системі спостереження за навколишнім середовищем. Після ретельного дослідження різних варіантів, було обрано датчик розчиненого кисню Pyroscience OPDOT.

Вимірювання вмісту розчиненого кисню (DO) є критично важливим для оцінки якості води та екологічного стану водойм. Занадто високий або занадто низький рівень кисню може негативно впливати на живі організми та екосистему в цілому. Саме тому точний та надійний контроль цього параметра має першорядне значення.

Було розглянуто різні технології вимірювання DO, вибір зупинився на оптичних датчиках, як найбільш перспективних для відповідних потреб. На відміну від традиційних електрохімічних сенсорів, оптичні датчики DO мають ряд суттєвих переваг. Вони менш чутливі до забруднень, не вимагають постійної заміни електроліту та мають довший термін служби. Це робить їх значно надійнішими та зручнішими у використанні.

Серед оптичних датчиків DO, модель Pyroscience OPDOT виділяється своїми характеристиками. Він здатний надавати точні вимірювання вмісту кисню в діапазоні від 0 до 20 мг/л з роздільною здатністю 0,01 мг/л. Така висока точність критично важлива для відстеження навіть незначних коливань рівня DO, що може свідчити про зміни в екосистемі.

Ще однією перевагою OPDOT є його невеликі габарити та можливість інтеграції безпосередньо в наші датчикові вузли. Компактний розмір датчика дозволяє легко розміщувати його в різних точках моніторингу, забезпечуючи всебічний контроль стану водойм.

Крім того, Pyroscience OPDOT виконано у водонепроникному корпусі, що робить його стійким до занурення у воду. Це вкрай важливо, адже наша система моніторингу передбачає розміщення датчиків безпосередньо у водному середовищі. Водонепроникність гарантує надійну роботу обладнання навіть за несприятливих погодних умов.

Таким чином, датчик розчиненого кисню Pyroscience OPDOT ідеально підходить для впровадження в нашу систему спостереження. Його висока точність, компактні розміри, водонепроникність та довгий термін служби в поєднанні з перевагами оптичної технології роблять його оптимальним вибором для ефективного моніторингу вмісту кисню у воді.

2.2.5 Вимірювання електропровідності води

Для вимірювання електропровідності води в системі моніторингу навколишнього середовища було досліджено різні варіанти датчиків. Було визначено, що цей параметр критично важливий для оцінки загального вмісту розчинених речовин у водному середовищі.

Було розглянуто ключові характеристики, на які слід звертати увагу при виборі датчика електропровідності. Передусім, було необхідно забезпечити широкий діапазон вимірювань, щоб датчик міг ефективно працювати як у прісних, так і у морських водах. Також важливими були високі показники точності та роздільної здатності, адже навіть незначні коливання електропровідності можуть свідчити про важливі зміни в екосистемі.

Після ретельного аналізу було обрано датчик Atlas Scientific K 1.0 Conductivity Probe. Цей сенсор здатний вимірювати електропровідність у діапазоні від 5 до 200,000 мікросіменс на сантиметр ($\mu\text{S}/\text{cm}$), що задовольняє вимоги до універсальності. При цьому він забезпечує високу точність вимірювань до 1% та роздільну здатність $0,1 \mu\text{S}/\text{cm}$, дозволяючи фіксувати навіть незначні зміни.

Було також визначено, що Atlas Scientific K 1.0 виконано у водонепроникному корпусі, що робить його стійким до занурення у воду та придатним для використання безпосередньо у водоймах. Компактні розміри датчика спрощують його монтаж і інтеграцію в систему моніторингу.

Крім того, було з'ясовано, що обраний датчик використовує цифровий інтерфейс для передачі даних, що забезпечує високу надійність сигналу та полегшує підключення до мікроконтролерної системи.

Таким чином, враховуючи широкий діапазон вимірювань, високу точність, водонепроникність і цифровий інтерфейс, датчик електропровідності Atlas Scientific K 1.0 Conductivity Probe було обрано як оптимальне рішення для впровадження в систему моніторингу навколишнього середовища.

2.2.6 Система живлення сенсорного вузла

Система живлення сенсорного вузла складається з кількох ключових компонентів, кожен з яких відіграє важливу роль у забезпеченні надійної та безперебійної роботи пристрою. Розглянемо кожен елемент докладніше.

Першим компонентом є сонячна панель. Для розроблюваної системи пропонується обрати сонячну панель SOLAR-SEN36-50W потужністю 50 Ват. Ця панель використовує монокристалічні елементи, які вважаються найефективнішими серед доступних сонячних технологій. На відміну від полікристалічних панелей, монокристалічні здатні виробляти більше енергії навіть у хмарну погоду або при непрямому освітленні. Це особливо важливо для регіонів з мінливим кліматом, де сонячне випромінювання не завжди оптимальне.

Для зберігання виробленої енергії рекомендується для використання літій-залізо-фосфатний акумулятор EVE LF280K. Цей тип акумулятора має ємність 280 ампер-годин та кілька суттєвих переваг порівняно з традиційними свинцево-кислотними батареями. По-перше, він витримує понад 2000 циклів заряду-розряду, що забезпечує тривалий термін служби – приблизно 5-7 років при щоденному використанні. По-друге, LiFePO₄ технологія є значно безпечнішою, оскільки такі акумулятори стійкі до перегріву та не схильні до займання навіть при пошкодженні.

Ключовим елементом системи є контролер заряду. В якості цього пристрою було обрано Victron Energy SmartSolar MPPT 75/15. Цей пристрій не просто перетворює сонячну енергію – він постійно відслідковує оптимальну точку потужності панелі (Maximum Power Point Tracking, MPPT), що дозволяє отримувати максимально можливу кількість енергії в будь-яких умовах освітлення. Вбудований Bluetooth-модуль дає можливість віддалено контролювати параметри системи через смартфон: рівень заряду акумулятора, поточну потужність генерації, статистику енергоспоживання тощо.

Для забезпечення надійного зв'язку сенсорний вузол пропонується оснастити двома комунікаційними модулями. Основним є LoRaWAN модуль RN2483 від Microchip Technology, який працює на частоті 868 МГц. Ця технологія спеціально розроблена для IoT-пристроїв і дозволяє передавати дані на відстань до 15 кілометрів при прямій видимості, споживаючи мінімум енергії. Як резервний канал використовується GSM модуль SIM800L, який забезпечує зв'язок через мережі мобільних операторів у випадках, коли основний канал недоступний.

Для надійності передбачено, що Всі компоненти розміщуються в спеціально розробленому корпусі з полікарбонату SABIC Lexan 943A. Цей матеріал обраний завдяки винятковій міцності та стійкості до впливу навколишнього середовища. Додавання УФ-стабілізаторів запобігає пожовтінню та деградації матеріалу під впливом сонячного випромінювання, забезпечуючи довгий термін служби корпусу. Конструкція має ступінь захисту IP68, що означає повну пилонепроникність та можливість тривалого занурення у воду. Це досягається використанням високоякісних ущільнювачів з EPDM гуми, яка зберігає еластичність при температурах від -50°C до +120°C, та спеціальних кабельних вводів з подвійним ущільненням. Прозора кришка корпусу - це важливий функціональний елемент, що дозволяє швидко оцінювати стан системи за світлодіодними індикаторами без необхідності відкривати корпус та порушувати його герметичність.

Така комплексна система живлення та захисту має забезпечувати безперебійну роботу сенсорного вузла протягом багатьох років навіть у складних

погодних умовах, що робить її ідеальним рішенням для довготривалого моніторингу параметрів води в аквакультурних господарствах.

2.3 Проєктування мережевої інфраструктури

Мережева інфраструктура будується на базі промислових LoRaWAN шлюзів Kerlink Wirnet iStation (табл. 2.6). Цей шлюз підтримує до 8 каналів одночасного прийому, має вбудований GPS приймач для точної синхронізації часу та може працювати в розширеному температурному діапазоні від -20 до +60°C. Підключення до мережі інтернет забезпечується через вбудований 4G модем або Ethernet.

LoRaWAN (Long Range Wide Area Network) - це протокол бездротового зв'язку, спеціально розроблений для створення енергоефективних мереж інтернету речей з великим радіусом дії.

Принцип роботи LoRa базується на інноваційних технологіях радіозв'язку, що забезпечують ефективну передачу даних на значні відстані. На фізичному рівні LoRa використовує особливу технологію розширеного спектру (spread spectrum modulation), яка була розроблена та запатентована компанією Semtech. Ця технологія є різновидом частотної модуляції з лінійно-частотною модуляцією (Chirp Spread Spectrum, CSS), де дані кодуються широкосмуговими частотними імпульсами з частотою, що збільшується або зменшується з часом.

Така технологія модуляції забезпечує надійну передачу сигналів на великі відстані з мінімальними енергозатратами, навіть при наявності значних перешкод та шумів. Важливою особливістю є стійкість до ефекту Доплера, що робить систему особливо ефективною для зв'язку з рухомими об'єктами.

Технічні характеристики Kerlink Wirnet iStation подані у табл. 2.6.

Таблиця 2.6 - Технічні характеристики Kerlink Wirnet iStation

Параметр	Значення
Кількість каналів LoRa	8 каналів одночасного прийому
Частотний діапазон	863-870 МГц (EU868)
Чутливість приймача	До -141 dBm
Потужність передавача	Регульована до +27 dBm
Підтримувані швидкості передачі	SF7 - SF12
Мережеві інтерфейси	Ethernet 10/100 Base-T, 4G/LTE модем
GPS	Вбудований GPS/ГЛОНАСС приймач
Процесор	ARM Cortex-A7 1.2 ГГц
Оперативна пам'ять	512 МБ DDR3
Флеш-пам'ять	8 ГБ eMMC
Живлення	PoE (802.3af) або 12В DC
Споживана потужність	Типова 15 Вт, максимальна 25 Вт
Температурний діапазон	від -20°C до +60°C
Вологозахист	IP67
Розміри	300 x 190 x 80 мм
Вага	2.3 кг
Підтримувані протоколи	LoRaWAN 1.0.3, UDP, TCP/IP
Віддалене управління	SSH, HTTP/HTTPS, SNMP
Моніторинг	Вбудована система діагностики
Антенні роз'єми	2 x N-type (основний + різноманітність)
Сертифікати	CE, FCC, RoHS

Архітектура мережі LoRaWAN Мережа LoRaWAN складається з чотирьох основних компонентів:

- кінцеві пристрої (End Nodes) - це датчики або актуатори, оснащені LoRa модулями. Вони збирають дані та відправляють їх на шлюзи. В нашому випадку це сенсорні вузли системи моніторингу води;
- шлюзи (Gateways) - приймають сигнали від кінцевих пристроїв та передають їх до мережевого сервера. Один шлюз може обслуговувати сотні або навіть тисячі кінцевих пристроїв;
- мережевий сервер (Network Server) - керує всією мережею, видаляє дублікати повідомлень, вибирає відповідний шлюз для відправки відповіді, виконує перевірку безпеки;
- сервер додатків (Application Server) - обробляє отримані дані та надає їх кінцевим користувачам через різні інтерфейси.

Ключові характеристики LoRaWAN:

- дальність зв'язку - у сільській місцевості при прямій видимості може досягати 15 км, у міській забудові - 2-5 км;
- швидкість передачі даних залежить від обраного коефіцієнта розширення та варіюється від 300 біт/с до 50 кбіт/с;
- енергоефективність - кінцеві пристрої можуть працювати від однієї батареї до 10 років завдяки технології адаптивної швидкості передачі даних (ADR).

LoRaWAN використовує 128-бітне шифрування AES та кілька рівнів ключів безпеки для захисту даних:

- Network Session Key для перевірки цілісності повідомлень;
- Application Session Key для шифрування даних додатків;
- Application Key для початкової активації пристрою.

Для розгортання мереж LoRaWAN використовується топологія "зірка із зірок", де кінцеві пристрої можуть підключатися до будь-якого доступного шлюзу.

В Європі використовується частотний діапазон 863-870 МГц, в США - 902-928 МГц. Кожен регіон має свої обмеження на потужність передачі та робочий цикл. Мережа автоматично оптимізує швидкість передачі даних та потужність передавача для кожного пристрою, враховуючи якість зв'язку.

Для розгортання мереж LoRaWAN використовується топологія "зірка із зірок", де кінцеві пристрої можуть підключатися до будь-якого доступного шлюзу. В Європі використовується частотний діапазон 863-870 МГц, в США - 902-928 МГц. Кожен регіон має свої обмеження на потужність передачі та робочий цикл. Мережа автоматично оптимізує швидкість передачі даних та потужність передавача для кожного пристрою, враховуючи якість зв'язку.

Переваги використання LoRaWAN:

- відкритий протокол;
- низька вартість розгортання;
- висока масштабованість;
- незалежність від мобільних операторів.

Обмеження та особливості застосування:

- низька швидкість передачі даних;
- затримки передачі;
- регіональні обмеження.

LoRaWAN особливо ефективна для таких застосувань як моніторинг навколишнього середовища, "розумне" сільське господарство, облік ресурсів, відстеження активів - тобто там, де потрібна передача невеликих обсягів даних на великі відстані при мінімальному енергоспоживанні.

Серверна частина системи розгортається на базі промислового сервера Dell PowerEdge R740 з двома процесорами Intel Xeon Gold 6240R (24 ядра кожен), 384 ГБ оперативної пам'яті та системою зберігання даних на базі NVMe SSD загальним обсягом 8 ТБ у RAID 10. Для забезпечення безперебійної роботи сервер підключається до джерела безперебійного живлення APC Smart-UPS SRT 5000VA з подвійним перетворенням (рис. 2.2).

Для візуального контролю на місці пропонується встановлення промислових панельних комп'ютерів Advantech PPC-3120S з 12-дюймовим сенсорним екраном та захистом IP65 по передній панелі. Вони забезпечують локальний доступ до системи моніторингу та можливість оперативного управління параметрами.

Все обране обладнання відповідає промисловим стандартам якості та має необхідні сертифікати відповідності. Особлива увага приділяється наявності технічної підтримки та доступності запасних частин на території України.

Для зниження вартості експлуатації передбачається можливість віддаленого оновлення програмного забезпечення всіх компонентів системи. Модульна конструкція дозволяє легко замінювати окремі компоненти при необхідності ремонту або модернізації. Комплексний підхід до вибору обладнання, з урахуванням вимог надійності, точності вимірювань та енергоефективності, забезпечує створення професійної системи моніторингу, здатної працювати в складних умовах аквакультурних господарств протягом тривалого часу.

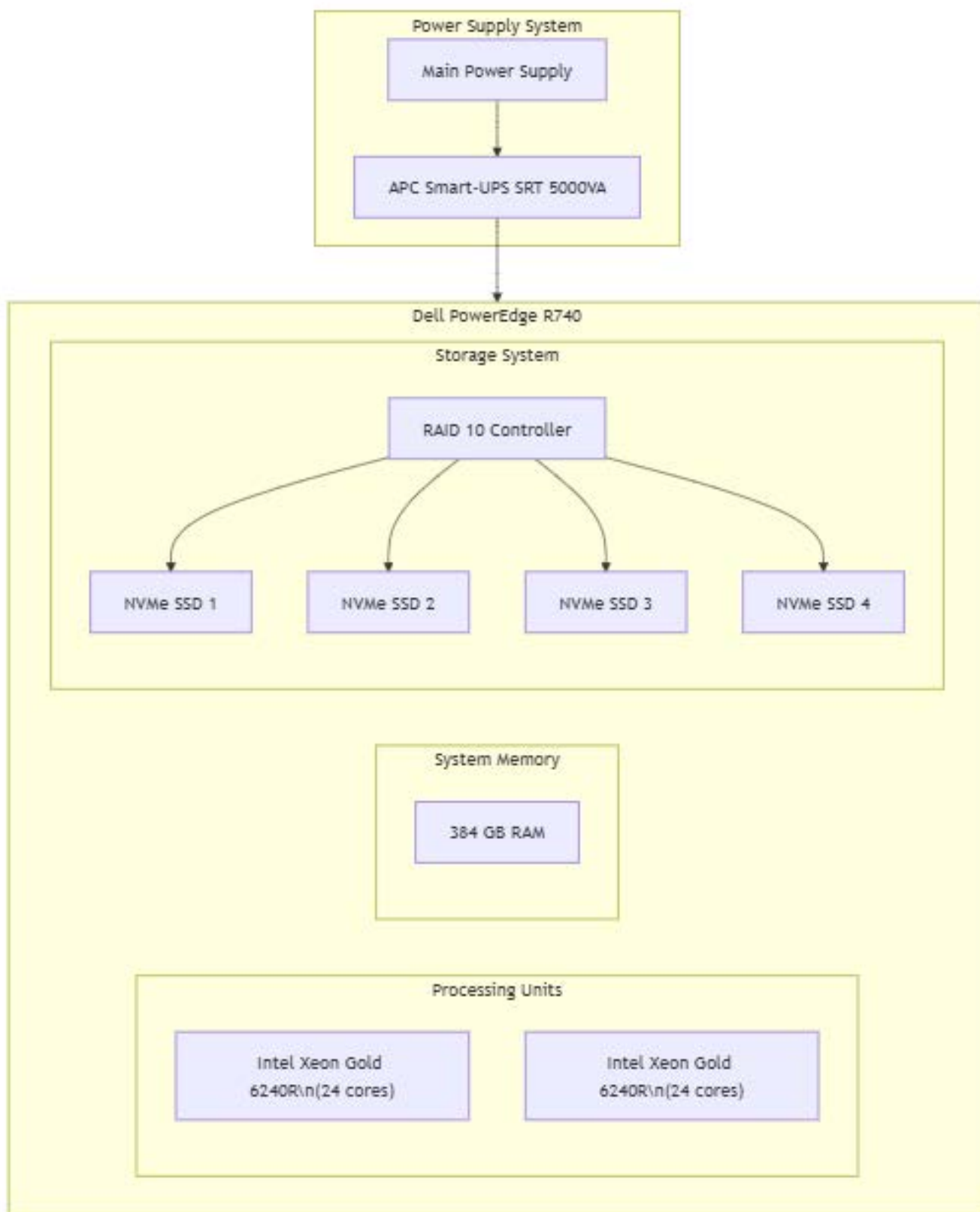


Рисунок 2.2 – Структурна схема серверної частини

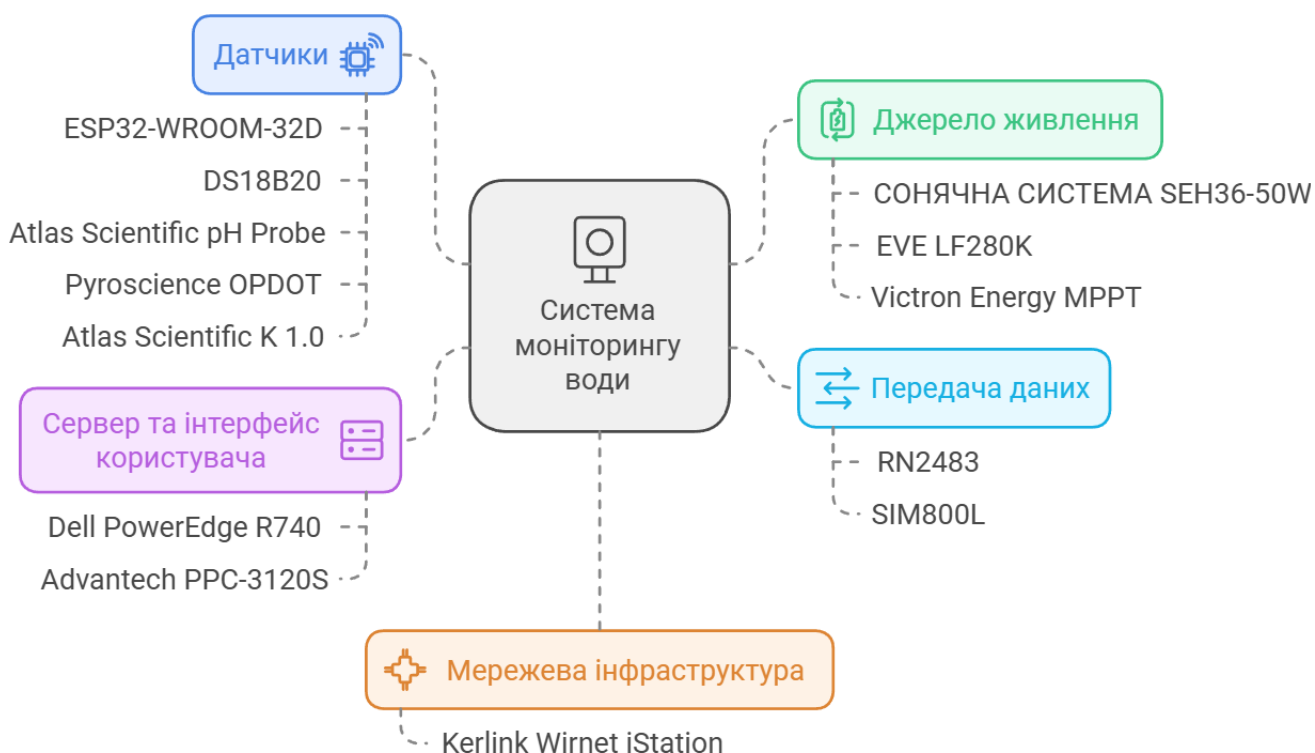


Рисунок 2.3 – Структурна схема системи моніторингу якості води

Мережева інфраструктура IoT системи моніторингу води для аквакультури побудована з урахуванням специфіки роботи рибних господарств та необхідності забезпечення безперебійного збору даних з сенсорних вузлів. В її основу покладено технологію LoRaWAN, яка забезпечує оптимальний баланс між дальністю зв'язку та енергоефективністю.

На території господарства встановлюються три базові станції LoRaWAN, розміщені на щоглах висотою 15-20 метрів. Таке розташування забезпечує надійне покриття території площею до 100 гектарів. Кожна базова станція оснащується основною всенаправленою антеною для загального покриття та додатковою спрямованою антеною для роботи з віддаленими ділянками. Для підключення базових станцій до інтернету використовується комбінована схема зв'язку. Основним каналом служить оптоволоконна лінія, яка забезпечує високу швидкість передачі даних та стабільність роботи. В якості резервного каналу використовується мобільний зв'язок 4G від двох різних операторів, що гарантує безперервність роботи системи навіть при пошкодженні оптоволоконної лінії.

На території господарства розгортається локальна мережа з використанням захищених промислових комутаторів. Вона забезпечує підключення відеокамер спостереження, точок доступу Wi-Fi та іншого мережевого обладнання. Мережа будується за кільцевою топологією, що дозволяє системі продовжувати роботу навіть при пошкодженні одного з кабельних з'єднань.

Особлива увага приділяється безпеці мережевої інфраструктури. Всі дані, що передаються через LoRaWAN, захищаються потужним шифруванням. Доступ до системи управління можливий тільки через захищене VPN-підключення з використанням двофакторної автентифікації. Мережа розділяється на окремі сегменти для різних типів трафіку, що підвищує загальний рівень безпеки.

Для контролю за роботою мережевої інфраструктури використовується система моніторингу, яка відстежує стан всіх компонентів в режимі реального часу. При виникненні будь-яких проблем система автоматично сповіщає обслуговуючий персонал через SMS та електронну пошту.

Живлення всіх критичних елементів мережевої інфраструктури забезпечується через джерела безперебійного живлення, які гарантують до 8 годин автономної роботи при відключенні основного електропостачання. Це особливо важливо для підтримки безперервності моніторингу параметрів води в аквакультурних господарствах.

Така організація мережевої інфраструктури забезпечує надійну роботу системи моніторингу в будь-яких умовах експлуатації та дозволяє легко розширювати систему при необхідності збільшення кількості контрольованих параметрів або площі моніторингу.

Таким чином, на території господарства розгортається локальна мережа з використанням захищених промислових комутаторів. Вона забезпечує підключення відеокамер спостереження, точок доступу Wi-Fi та іншого мережевого обладнання. Мережа будується за кільцевою топологією, що дозволяє системі продовжувати роботу навіть при пошкодженні одного з кабельних з'єднань.

Особлива увага приділяється безпеці мережевої інфраструктури. Всі дані, що передаються через LoRaWAN, захищаються потужним шифруванням. Доступ

до системи управління можливий тільки через захищене VPN-підключення з використанням двофакторної автентифікації. Мережа розділяється на окремі сегменти для різних типів трафіку, що підвищує загальний рівень безпеки.

Для контролю за роботою мережевої інфраструктури використовується система моніторингу, яка відстежує стан всіх компонентів в режимі реального часу. При виникненні будь-яких проблем система автоматично сповіщає обслуговуючий персонал через SMS та електронну пошту.

Живлення всіх критичних елементів мережевої інфраструктури забезпечується через джерела безперебійного живлення, які гарантують до 8 годин автономної роботи при відключенні основного електропостачання. Це особливо важливо для підтримки безперервності моніторингу параметрів води в аквакультурних господарствах.

Така організація мережевої інфраструктури забезпечує надійну роботу системи моніторингу в будь-яких умовах експлуатації та дозволяє легко розширювати систему при необхідності збільшення кількості контрольованих параметрів або площі моніторингу.

2.4 Висновки до розділу 2

Запропонована чотирирівнева архітектура системи забезпечує повний цикл збору, обробки та аналізу даних. Сенсорний рівень представлено мережею автономних вимірювальних вузлів з високоточними датчиками. Мережевий рівень, побудований на базі технології LoRaWAN, гарантує надійну передачу даних на відстань до 15 км. Серверний рівень забезпечує обробку та аналіз даних у реальному часі, а рівень візуалізації надає зручний доступ до інформації через веб-інтерфейс та мобільний додаток.

На основі порівняльного аналізу було обрано оптимальні компоненти системи. В якості центрального процесора сенсорних вузлів обрано

мікроконтролер ESP32-WROOM-32D, який забезпечує необхідну обчислювальну потужність та має вбудовані засоби бездротового зв'язку. Для вимірювання параметрів води використовуються високоточні датчики: цифровий температурний датчик DS18B20, pH-електрод Atlas Scientific, оптичний датчик розчиненого кисню Pyroscience OPDOT та датчик електропровідності Atlas Scientific K 1.0.

Система живлення сенсорних вузлів базується на сонячній панелі SOLAR-SEN36-50W та літій-залізо-фосфатному акумуляторі EVE LF280K, що забезпечує автономну роботу протягом тривалого часу. Контролер заряду Victron Energy SmartSolar MPPT 75/15 оптимізує процес заряджання та дозволяє віддалено контролювати стан системи живлення.

Мережева інфраструктура побудована на базі промислових LoRaWAN шлюзів Kerlink Wirnet iStation, які забезпечують надійний зв'язок з сенсорними вузлами. Для обробки даних використовується потужний сервер Dell PowerEdge R740, а для локального контролю встановлюються промислові панельні комп'ютери Advantech PPC-3120S.

Особлива увага приділена питанням надійності та безпеки системи. Всі компоненти мають промислове виконання та захист від впливу навколишнього середовища. Передбачено резервні канали зв'язку та системи безперебійного живлення. Передача даних захищена сучасними протоколами шифрування.

3 РОЗРОБКА СТРУКТУРИ СИСТЕМИ

3.1 Структурна схема системи

Схема на рис. 3.1 демонструє основні компоненти системи та їх взаємозв'язки.

Система живлення включає:

- сонячну панель 50Вт;
- контролер заряду з MPPT;

- LiFePO₄ акумулятор;
- DC-DC перетворювач на 3.3В.

Центральним елементом є мікроконтролер ESP32-WROOM-32D. До мікроконтролера підключаються датчики:

- температури (DS18B20);
- рН з інтерфейсним модулем;
- розчиненого кисню з інтерфейсом;
- електропровідності з інтерфейсом.

Комунікаційні модулі включають в себе:

- LoRaWAN модуль RN2483;
- GSM модуль SIM800L;
- вбудований Bluetooth LE.

Додаткові інтерфейси:

- LED індикація;
- UART для діагностики;
- зовнішня Flash пам'ять.

Всі з'єднання мають виконуватися з урахуванням вимог до захисту від вологи та електромагнітних завад.

Розроблена система базується на мікроконтролері ESP32-WROOM-32D та включає автономне живлення від сонячної панелі потужністю 50Вт з MPPT контролером заряду, LiFePO₄ акумулятором та DC-DC перетворювачем на 3.3В. До мікроконтролера підключається набір датчиків для моніторингу параметрів води: температури (DS18B20), рН, розчиненого кисню та електропровідності, кожен з відповідним інтерфейсним модулем.

Комунікаційна частина системи забезпечується модулями LoRaWAN (RN2483), GSM (SIM800L) та вбудованим Bluetooth LE, а також включає LED індикацію, UART для діагностики та зовнішню Flash пам'ять. Всі компоненти системи та їх з'єднання розроблені з урахуванням вимог до захисту від вологи та

електромагнітних завад, що забезпечує надійну роботу в умовах водного господарства.

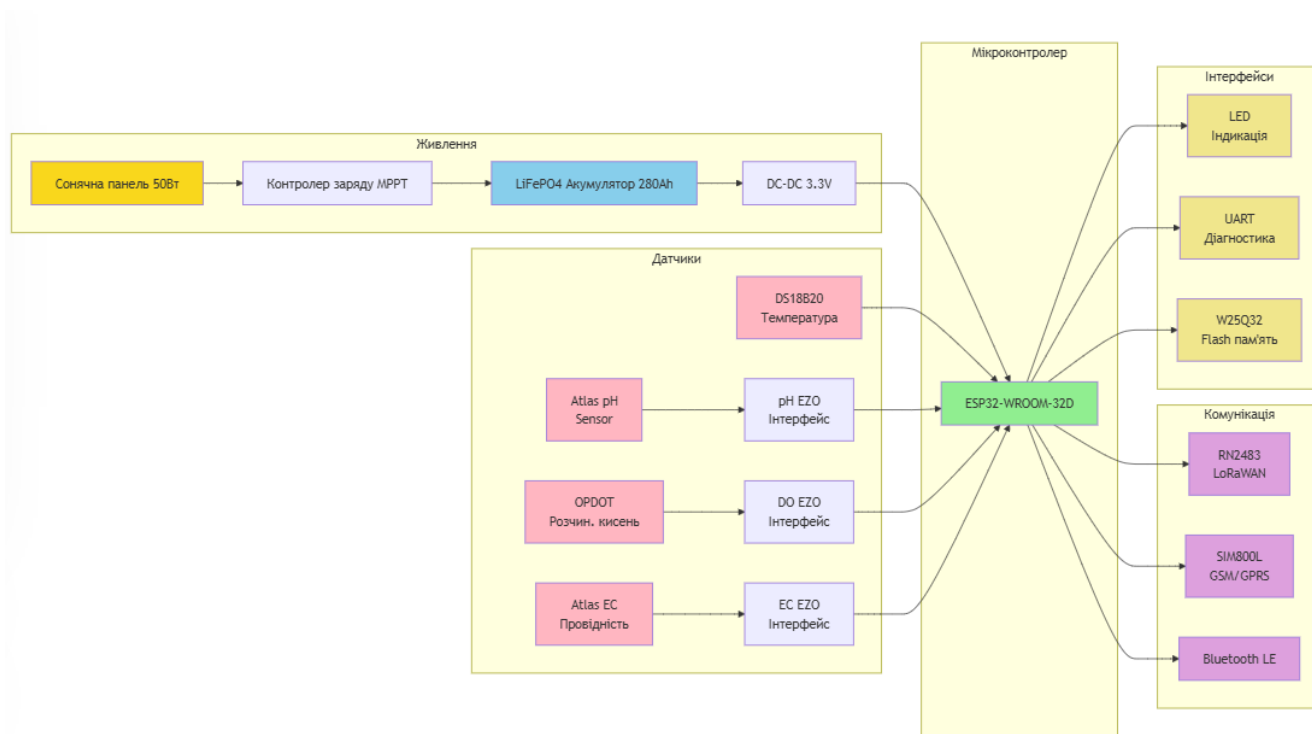


Рисунок 3.1 – Структурна схема системи контролю рідини

3.2 Інтеграція датчиків

Інтеграція датчиків у систему моніторингу води для аквакультури є критично важливим етапом, який визначає точність та надійність всієї системи. Процес інтеграції включає механічне встановлення, електричне підключення, калібрування та налаштування програмного забезпечення для кожного типу датчиків.

Першим етапом є підготовка датчиків температури DS18B20 у водонепроникному виконанні. Кожен датчик має мати унікальну заводську адресу, яка зчитується та зберігається в системі для подальшої ідентифікації. Датчики розміщуються в спеціальних захисних гільзах з нержавіючої сталі, що забезпечує

їх механічний захист та полегшує обслуговування. Кабелі датчиків прокладаються в гофрованих трубах з додатковим ущільненням у місцях з'єднань.

pH-електроди Atlas Scientific потребують особливо ретельної інтеграції. Перед встановленням кожен електрод має проходити процедуру активації в спеціальному розчині протягом 24 годин. Калібрування виконується за трьома точками (pH 4, 7 та 10) з використанням сертифікованих буферних розчинів. Електроди встановлюються під кутом 35 градусів для запобігання накопичення бульбашок повітря на мембрані. Інтерфейсний модуль pH EZO налаштовується на режим безперервного вимірювання з інтервалом 1 секунда та автоматичною температурною компенсацією.

Передбачається, що оптичні датчики розчиненого кисню Pyroscience OPDOT монтуються в проточній камері з системою примусової циркуляції води. Це має забезпечити постійне оновлення води навколо чутливого елемента та підвищити точність вимірювань. Калібрування виконується за двома точками: в насиченій киснем воді (100% насичення) та в розчині сульфату натрію (0% кисню). Важливим аспектом є захист оптичного елемента від прямого сонячного світла, для чого використовуються спеціальні світлозахисні кожухи.

Датчики електропровідності Atlas Scientific K 1.0 за специфікацією повинні встановлюються в вертикальному положенні для забезпечення вільного протікання води між електродами. Перед калібруванням електроди очищуються спеціальним розчином для видалення органічних забруднень. Калібрування виконується з використанням стандартних розчинів 1413 мкСм/см та 12880 мкСм/см. Інтерфейсний модуль налаштовується на автоматичну компенсацію температурної залежності провідності.

Всі датчики підключаються до центрального блоку через захищені роз'єми M12 з класом захисту IP68. Кожен кабель має індивідуальне екранування, а його довжина оптимізується для мінімізації впливу електромагнітних завад. В місцях проходження кабелів через корпус встановлюються кабельні вводи з подвійним ущільненням та додатковим захистом від механічних навантажень.

Програмна інтеграція датчиків включає розробку драйверів для кожного типу сенсорів. Для температурних датчиків використовується бібліотека OneWire з додатковими функціями фільтрації шумів та виявлення збоїв. Інтерфейсні модулі Atlas Scientific підключаються через UART з реалізацією протоколу I2C для зменшення кількості необхідних проводів. Особлива увага приділяється обробці даних з датчиків. Реалізується медіанна фільтрація для усунення випадкових викидів, а також алгоритми виявлення некоректних показань. Для кожного параметра встановлюються допустимі діапазони значень та швидкості зміни, при перевищенні яких генеруються відповідні сповіщення.

Для забезпечення довготривалої стабільності вимірювань розробляється графік періодичного калібрування датчиків. В програмному забезпеченні реалізується система нагадувань про необхідність проведення калібрування та ведеться журнал всіх калібрувань з можливістю аналізу дрейфу характеристик датчиків.

Важливим аспектом є енергоефективність роботи датчиків. Для цього має реалізовуватися алгоритм адаптивної частоти опитування, який зменшує частоту вимірювань при стабільних показниках і збільшує її при виявленні тенденції до зміни параметрів. Датчики, що не потребують постійного живлення, відключаються в проміжках між вимірюваннями.

3.3 Розробка енергоефективної системи живлення

Розробка енергоефективної схеми живлення для IoT системи моніторингу води в аквакультурі є ключовим елементом, що забезпечує автономність та надійність роботи всієї системи. Особлива увага приділяється оптимізації енергоспоживання та забезпеченню безперебійної роботи в різних погодних умовах.

Пропонується наступна система живлення. Основним джерелом енергії для системи виступає сонячна панель потужністю 50 Вт з монокристалічних елементів. Вибір такої потужності обґрунтований розрахунками енергоспоживання системи з урахуванням сезонних змін тривалості світлового дня та можливого забруднення панелі. Панель встановлюється на регульованому кронштейні, що дозволяє оптимізувати кут нахилу відповідно до пори року. Для підвищення ефективності використовується спеціальне антивідблискуюче покриття, яке також має властивості самоочищення.

Ключовим елементом системи живлення є контролер заряду Victron Energy SmartSolar MPPT 75/15, який забезпечує інтелектуальне керування процесом заряду акумулятора від сонячної панелі. Цей пристрій використовує передову технологію пошуку точки максимальної потужності (MPPT), яка дозволяє отримати до 30% більше енергії порівняно з традиційними PWM контролерами. Контролер в реальному часі аналізує вольт-амперну характеристику сонячної панелі та автоматично підлаштовує параметри перетворення для досягнення максимальної ефективності, враховуючи такі фактори як рівень освітленості, температуру панелі та поточний стан акумулятора. Вбудований алгоритм швидкого відстеження MPPT особливо ефективний при змінній хмарності, забезпечуючи оптимальний відбір потужності навіть в умовах нестабільного освітлення. Порівняльна таблиця характеристик Victron Energy SmartSolar MPPT 75/15 з аналогами подана в табл. 3.1.

Для накопичення енергії використовується літій-залізо-фосфатний (LiFePO_4) акумулятор ємністю 280 Ач. Цей тип акумулятора обраний завдяки оптимальному поєднанню характеристик: тривалий термін служби (більше 2000 циклів), безпечність експлуатації, стабільна напруга розряду та широкий температурний діапазон роботи. Акумулятор розміщується в теплоізовьованому відсіку з системою підігріву для холодної пори року, що забезпечує підтримання оптимальної температури для ефективної роботи. Рекомендується вибір акумулятора з поданих в табл. 3.2.

Таблиця 3.1 - Порівняльна таблиця характеристик Victron Energy SmartSolar MPPT 75/15 з аналогами

Характеристика	Victron Energy SmartSolar MPPT 75/15	Renogy Wanderer Li 30A MPPT	EPever Tracer 3210AN
Максимальна напруга сонячних панелей	75В	100В	100В
Максимальний струм заряду	15А	30А	30А
Номинальна напруга акумулятора	12/24В	12/24В	12/24В
Тип акумуляторів	AGM, GEL, Li-ion, LiFePO4	Li-ion, LiFePO4, AGM, Flooded	AGM, GEL, Li-ion, LiFePO4
Ефективність перетворення	98%	98%	98%
Bluetooth-підключення	Вбудоване	Через додатковий модуль	Через додатковий модуль
Захист від	Перенапруги, короткого замикання, зворотної полярності	Перенапруги, короткого замикання, зворотної полярності	Перенапруги, короткого замикання, зворотної полярності

Таблиця 3.2 – Варіанти акумуляторів

Характеристика	EVE LF280	CALB CA280	Pylontech US2000C
Номинальна ємність	280Ah	280Ah	280Ah
Номинальна напруга	3.2В	3.2В	3.2В
Робоча напруга	2.5-3.65В	2.5-3.65В	2.5-3.65В
Максимальний струм заряду	0.5С (140А)	0.3С (84А)	0.5С (140А)
Максимальний струм розряду	1С (280А)	1С (280А)	1С (280А)
Цикл служби (80% DOD)	>4000 циклів	>4000 циклів	>6000 циклів
Вага елемента	5.6 кг	5.8 кг	5.4 кг
Робоча температура	-20°C до +60°C	-20°C до +55°C	-10°C до +50°C

Система розподілу живлення будується на основі високоефективних DC-DC перетворювачів з ККД понад 95%. Основний перетворювач забезпечує стабільну

напругу 3.3В для живлення мікроконтролера та периферійних пристроїв. Додатково використовуються окремі перетворювачі для живлення датчиків, що вимагають специфічних напруг. Всі перетворювачі мають захист від короткого замикання та перевантаження.

Для енергоефективності роботи всіх компонентів системи реалізується багаторівнева схема управління енергоспоживанням:

- мікроконтролер працює в режимі динамічної зміни тактової частоти, автоматично знижуючи її при відсутності активних завдань;
- датчики активуються тільки на час вимірювання, в проміжках перебувають у сплячому режимі;
- радіомодулі вмикаються за розкладом для передачі даних;
- система підігріву акумулятора працює тільки при критичному зниженні температури.

Для моніторингу стану системи живлення використовуються спеціалізовані датчики струму та напруги з високою точністю вимірювання. Це дозволяє вести детальну статистику енергоспоживання та прогнозувати можливі проблеми. Реалізується алгоритм прогнозування доступної енергії на основі даних про погодні умови та історії енергоспоживання.

У разі критичного зниження рівня заряду акумулятора система автоматично переходить в режим економії енергії, відключаючи некритичні компоненти та збільшуючи інтервали між вимірюваннями. При цьому зберігається мінімально необхідний моніторинг найважливіших параметрів води.

Для підвищення надійності передбачається можливість підключення зовнішнього джерела живлення через спеціальний роз'єм. Це дозволяє виконувати обслуговування системи або забезпечувати її роботу в періоди тривалої відсутності сонячного світла.

Система доповнюється модулем дистанційного моніторингу параметрів живлення, який дозволяє віддалено контролювати:

- напругу та струм сонячної панелі;
- стан заряду акумулятора;

- температуру компонентів;
- споживання енергії різними підсистемами.

Вся інформація про роботу системи живлення має зберігатися в енергонезалежній пам'яті та може бути використана для оптимізації енергоспоживання та планування обслуговування. Регулярно проводиться аналіз ефективності роботи системи з метою виявлення можливостей для поліпшення. Така комплексна організація системи живлення забезпечує надійну та енергоефективну роботу IoT системи моніторингу води в різних умовах експлуатації, що є критично важливим для аквакультурних господарств.

3.4 Висновки до розділу 3

Розроблена структурна схема системи демонструє ефективну інтеграцію всіх компонентів, включаючи систему живлення на базі сонячної панелі потужністю 50 Вт з MPPT-контролером та LiFePO₄ акумулятором, центральний мікроконтролер ESP32-WROOM-32D, комплекс високоточних датчиків для вимірювання параметрів води та різноманітні комунікаційні модулі. Така архітектура забезпечує надійну автономну роботу системи та гнучкість у передачі даних.

Інтеграція датчиків реалізована з урахуванням специфічних вимог кожного типу сенсорів. Для температурних датчиків DS18B20 забезпечено водонепроникне виконання та унікальну адресацію. pH-електроди Atlas Scientific встановлюються з дотриманням спеціальних вимог щодо кута нахилу та калібрування. Оптичні датчики розчиненого кисню Pyroscience OPDOT розміщуються в проточних камерах із захистом від сонячного світла. Датчики електропровідності Atlas Scientific K 1.0 монтуються з урахуванням вимог до орієнтації та калібрування. Всі підключення виконані через захищені роз'єми з класом захисту IP68, а програмне забезпечення включає алгоритми фільтрації та валідації даних.

Система живлення розроблена з акцентом на енергоефективність та надійність. Використання монокристалічної сонячної панелі з MPPT-контролером Victron Energy SmartSolar MPPT 75/15 забезпечує максимальну ефективність перетворення сонячної енергії. Літій-залізо-фосфатний акумулятор ємністю 280 Ач гарантує тривалу автономну роботу системи. Реалізована багаторівнева схема управління енергоспоживанням оптимізує роботу всіх компонентів, а система моніторингу дозволяє віддалено контролювати стан живлення.

Розроблена структура системи забезпечує оптимальний баланс між функціональністю, надійністю та енергоефективністю, що робить її придатною для довготривалої експлуатації в умовах аквакультурних господарств. Модульний підхід до проєктування дозволяє легко масштабувати та модифікувати систему відповідно до конкретних потреб користувачів.

4 РОЗРОБКА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

4.1 Підключення DS18B20 до ESP32-WROOM-32D

Таблиця 4.1 показує підключення DS18B20 до ESP32-WROOM-32D.

Таблиця 4.1 -Таблиця підключень DS18B20 до ESP32-WROOM-32D

DS18B20	ESP32-WROOM-32D	Примітки
VDD (червоний)	3.3V	Живлення датчика
GND (чорний)	GND	Загальний провід
DQ (жовтий)	GPIO 4	Лінія даних, потребує підтягуючий резистор

Додаткові компоненти п ідтягуючий резистор 4.7 кОм між VDD та DQ та керамічний конденсатор 0.1 мкФ між VDD та GND для фільтрації завад.

Особливості підключення:

- рекомендується використовувати екранований кабель при довжині лінії понад 20 см;
- екран кабелю підключається до GND тільки з одного боку (зі сторони ESP32);
- при використанні водонепроникної версії DS18B20 кольори проводів можуть відрізнятися - необхідно звернутися з документацією виробника;
- для підвищення завадостійкості рекомендується розміщувати підтягуючий резистор максимально близько до входу ESP32;
- при використанні довгих ліній (>2 м) рекомендується знизити номінал підтягуючого резистора до 2.2 кОм.

Код написано мовою C++ з використанням Arduino IDE, яка є стандартним середовищем розробки для ESP32 та інших мікроконтролерів. У коді використовуються спеціальні бібліотеки OneWire та DallasTemperature, які є частиною екосистеми Arduino.

Вибір C++ для цього завдання обумовлений кількома факторами:

- C++ забезпечує прямий доступ до апаратних ресурсів мікроконтролера, що критично важливо для роботи з периферійними пристроями;
- мова має низькі накладні витрати при виконанні, що особливо важливо для систем з обмеженими ресурсами;
- Arduino IDE та її бібліотеки базуються саме на C++, що забезпечує повну сумісність та доступ до всіх необхідних функцій.

Розроблений код (ліст. 4.1) включає декілька важливих аспектів:

Медіанна фільтрація:

- використовується буфер з 5 останніх вимірювань;
- медіанне значення ефективно відфільтровує викиди;
- бульбашкове сортування для знаходження медіани оптимальне для малої кількості значень.

Валідація даних:

- перевірка на фізично можливий діапазон температур;

- контроль швидкості зміни температури;
- виявлення апаратних помилок датчика.

Оптимізація роботи:

- встановлення максимальної роздільної здатності (12 біт);
- використання затримки 1 секунда між вимірюваннями;
- буферизація даних для фільтрації.

Лістинг 4.1 - Підключення DS18B20 до ESP32-WROOM-32D

```
#include <OneWire.h>
#include <DallasTemperature.h>

// Визначення піну для підключення DS18B20
#define ONE_WIRE_BUS 4

// Константи для фільтрації та валідації даних
#define SAMPLES_COUNT 5 // Кількість вимірювань для
медіанної фільтрації
#define MIN_VALID_TEMP -5.0 // Мінімальна допустима
температура
#define MAX_VALID_TEMP 40.0 // Максимальна допустима
температура
#define MAX_TEMP_CHANGE 1.0 // Максимальна допустима зміна
температури між вимірюваннями
#define INVALID_TEMP -127.0 // Значення, яке повертає датчик
при помилці зчитування

// Ініціалізація об'єктів для роботи з датчиком
OneWire oneWire(ONE_WIRE_BUS);
DallasTemperature sensors(&oneWire);

// Масив для зберігання останніх вимірювань
float tempHistory[SAMPLES_COUNT];
float lastValidTemp = 0.0;

void setup() {
    Serial.begin(115200);

    // Ініціалізація датчика
    sensors.begin();

    // Встановлення роздільної здатності 12 біт (0.0625°C)
    sensors.setResolution(12);
```

```

// Заповнення масиву історії нульовими значеннями
for(int i = 0; i < SAMPLES_COUNT; i++) {
    tempHistory[i] = 0.0;
}

// Функція медіанної фільтрації
float getMedian(float values[], int size) {
    // Створюємо тимчасовий масив для сортування
    float temp[size];
    for(int i = 0; i < size; i++) {
        temp[i] = values[i];
    }

    // Сортування бульбашковим методом
    for(int i = 0; i < size-1; i++) {
        for(int j = 0; j < size-i-1; j++) {
            if(temp[j] > temp[j+1]) {
                float t = temp[j];
                temp[j] = temp[j+1];
                temp[j+1] = t;
            }
        }
    }

    // Повертаємо медіанне значення
    return temp[size/2];
}

// Функція перевірки валідності температури
bool isValidTemperature(float temp) {
    // Перевірка на помилку зчитування
    if(temp == INVALID_TEMP) return false;

    // Перевірка діапазону
    if(temp < MIN_VALID_TEMP || temp > MAX_VALID_TEMP) return false;

    // Перевірка швидкості зміни
    if(abs(temp - lastValidTemp) > MAX_TEMP_CHANGE && lastValidTemp != 0.0) return false;

    return true;
}

// Функція зсуву масиву історії
void shiftHistory(float newValue) {
    for(int i = 0; i < SAMPLES_COUNT-1; i++) {
        tempHistory[i] = tempHistory[i+1];
    }
}

```

```

    }
    tempHistory[SAMPLES_COUNT-1] = newValue;
}

void loop() {
    // Запит температури
    sensors.requestTemperatures();

    // Отримання значення температури
    float currentTemp = sensors.getTempCByIndex(0);

    // Перевірка валідності
    if(isValidTemperature(currentTemp)) {
        // Зсув масиву історії та додавання нового значення
        shiftHistory(currentTemp);

        // Обчислення медіанного значення
        float filteredTemp = getMedian(tempHistory, SAMPLES_COUNT);

        // Оновлення останнього валідного значення
        lastValidTemp = filteredTemp;

        // Виведення результатів
        Serial.print("Raw temperature: ");
        Serial.print(currentTemp);
        Serial.print("°C, Filtered temperature: ");
        Serial.print(filteredTemp);
        Serial.println("°C");
    } else {
        Serial.println("Invalid temperature reading detected!");
    }

    // Затримка між вимірюваннями
    delay(1000);
}

```

4.2 Підключення pH-електрода Atlas Scientific до ESP32-WROOM-32D

EZO™ EC Circuit представляє собою спеціалізовану інтерфейсну плату, розроблену компанією Atlas Scientific для точного вимірювання електропровідності води. Ця плата є високоінтегрованим мікроконтролерним модулем, який забезпечує не лише вимірювання електропровідності, але й виконує

автоматичну температурну компенсацію та має вбудовані функції калібрування для досягнення максимальної точності вимірювань.

Таблиця 4.2 - Таблиця підключень інтерфейсної плати EZO™ pH Circuit

Atlas EZO pH	ESP32-WROOM-32D	Примітки
VCC	3.3V	Живлення схеми, споживання до 15mA
GND	GND	Загальний провід
TX	GPIO 16 (RX2)	UART прийом даних від EZO
RX	GPIO 17 (TX2)	UART передача даних до EZO
PRB	pH-електрод	Екранований роз'єм BNC для підключення електрода

Додаткові компоненти та вимоги:

- феритове кільце на кабель pH-електрода для придушення ВЧ завад;
- екранований кабель для з'єднання EZO плати з ESP32 при відстані >10 см;
- розв'язуючий конденсатор 0.1 мкФ між VCC та GND біля EZO плати;
- рекомендована відстань від силових ліній >30 см.

Особливості підключення:

- UART налаштовується на швидкість 9600 бод;
- pH-електрод підключається через BNC роз'єм з обов'язковим заземленням екрану;
- використовується апаратний UART2 ESP32 для надійного обміну даними;
- екран кабелю заземлюється тільки з боку EZO плати;
- періодичність калібрування pH-електрода - раз на місяць.

Лістинг 4.2 - Підключення Atlas Scientific до ESP32-WROOM-32D

```
#include <HardwareSerial.h>
```

```
// Визначення констант
```

```
#define EZO_SERIAL Serial2
```

```

#define SAMPLES_COUNT 7 // Розмір вікна
медіанного фільтра
#define MIN_VALID_PH 0.0 // Мінімальне допустиме
значення pH
#define MAX_VALID_PH 14.0 // Максимальне допустиме
значення pH
#define MAX_PH_CHANGE 0.5 // Максимальна допустима
зміна pH між вимірюваннями
#define RESPONSE_TIMEOUT 1000 // Таймаут очікування
відповіді від EZO (мс)
#define MEASUREMENT_INTERVAL 1000 // Інтервал між
вимірюваннями (мс)

// Масив для зберігання історії вимірювань
float pHHistory[SAMPLES_COUNT];
float lastValidPh = 7.0; // Початкове значення pH
(нейтральне)
unsigned long lastMeasurementTime = 0;

// Ініціалізація послідовного порту для EZO
void setup() {
    Serial.begin(115200); // Порт для відладки
    EZO_SERIAL.begin(9600, SERIAL_8N1, 16, 17); // UART2 для
EZO

    // Ініціалізація масиву історії нейтральними значеннями
    for(int i = 0; i < SAMPLES_COUNT; i++) {
        pHHistory[i] = 7.0;
    }

    // Налаштування EZO pH Circuit
    delay(1000); // Затримка для
ініціалізації EZO
    EZO_SERIAL.print("E\r"); // Вимкнення неперервного
режиму
    delay(100);
    EZO_SERIAL.print("L0\r"); // Вимкнення LED
індикації
}

// Функція зчитування відповіді від EZO
String readEZOResponse() {
    String response = "";
    unsigned long startTime = millis();

    while(millis() - startTime < RESPONSE_TIMEOUT) {
        if(EZO_SERIAL.available()) {
            char c = EZO_SERIAL.read();
            if(c == '\r') break;

```

```

        response += c;
    }
}
return response;
}

// Функція отримання значення рН
float readPH() {
    EZO_SERIAL.print("R\r");          // Команда зчитування
    String response = readEZOResponse();

    if(response.length() > 0) {
        return response.toFloat();
    }
    return -1.0;                      // Помилка зчитування
}

// Функція медіанної фільтрації
float getMedian(float values[], int size) {
    // Створюємо тимчасовий масив для сортування
    float temp[size];
    memcpy(temp, values, size * sizeof(float));

    // Сортування вставками (ефективне для малих масивів)
    for(int i = 1; i < size; i++) {
        float key = temp[i];
        int j = i - 1;
        while(j >= 0 && temp[j] > key) {
            temp[j + 1] = temp[j];
            j--;
        }
        temp[j + 1] = key;
    }

    return temp[size / 2];
}

// Функція перевірки валідності значення рН
bool isValidPH(float ph) {
    // Перевірка діапазону
    if(ph < MIN_VALID_PH || ph > MAX_VALID_PH) return false;

    // Перевірка швидкості зміни
    if(abs(ph - lastValidPh) > MAX_PH_CHANGE) return false;

    return true;
}

// Функція зсуву масиву історії

```

```

void shiftHistory(float newValue) {
    memmove(&phHistory[0], &phHistory[1], (SAMPLES_COUNT -
1) * sizeof(float));
    phHistory[SAMPLES_COUNT - 1] = newValue;
}

void loop() {
    // Перевірка часу останнього вимірювання
    if(millis() - lastMeasurementTime >=
MEASUREMENT_INTERVAL) {
        float currentPH = readPH();

        if(currentPH > 0) { // Перевірка успішності
зчитування
            if(isValidPH(currentPH)) {
                // Зсув масиву історії та додавання нового
значення
                shiftHistory(currentPH);

                // Обчислення медіанного значення
                float filteredPH = getMedian(phHistory,
SAMPLES_COUNT);

                // Оновлення останнього валідного значення
                lastValidPh = filteredPH;

                // Виведення результатів
                Serial.print("Raw pH: ");
                Serial.print(currentPH, 3);
                Serial.print(", Filtered pH: ");
                Serial.println(filteredPH, 3);
            } else {
                Serial.println("Invalid pH reading detected!");
            }
        } else {
            Serial.println("Error reading pH sensor!");
        }

        lastMeasurementTime = millis();
    }
}

```

Розроблений програмний код (ліст. 4.1) для роботи з pH-електродом Atlas Scientific має кілька ключових технічних особливостей, які забезпечують його надійну та ефективну роботу.

Насамперед, для забезпечення надійної комунікації з EZO платою використовується апаратний UART2 мікроконтролера ESP32. Це рішення гарантує стабільний обмін даними та мінімізує можливість втрати інформації. В коді реалізована система контролю таймаутів при читанні відповідей від плати, що дозволяє уникнути зависань програми при проблемах зі зв'язком. Особлива увага приділена коректній ініціалізації EZO плати, що включає необхідні затримки та налаштування режимів роботи.

Для забезпечення високої точності та надійності вимірювань у системі реалізовано комплексний підхід до фільтрації даних. Основою цього підходу є медіанний фільтр з вікном у 7 значень. Цей тип фільтру особливо ефективний для усунення випадкових викидів та шумів у показаннях сенсора, які можуть виникати внаслідок зовнішніх впливів чи внутрішніх збоїв.

Медіанний фільтр працює за простим принципом: для кожного значення він розглядає "вікно" з 7 сусідніх значень (включаючи саме значення), сортує їх за величиною та вибирає медіанне (середнє) значення. Таким чином, екстремальні викиди, які сильно відрізняються від сусідніх значень, відкидаються, а більш типові значення залишаються. Це дозволяє згладити раптові стрибки та провали у даних, отримуючи більш чистий і достовірний сигнал.

Важливим аспектом роботи медіанного фільтру є ефективність сортування значень у вікні. Для цього в системі застосовується алгоритм сортування вставками (insertion sort). Цей алгоритм оптимізований саме для невеликих масивів даних, якими і є вікно з 7 значень. На відміну від більш відомого бульбашкового сортування (bubble sort), сортування вставками працює швидше на малих об'ємах даних, оскільки має меншу кількість порівнянь та перестановок елементів. А в контексті фільтрації даних з сенсора швидкодія є критично важливою для забезпечення реальної обробки сигналу в режимі реального часу.

Ще одним важливим елементом системи фільтрації є ефективна робота з пам'яттю при зсуві масиву історії значень. Кожен новий відфільтрований відлік потрібно додати в масив, одночасно видаливши найстаріший. Для цього використовується функція `memmove`, яка забезпечує швидке та безпечне

переміщення блоків пам'яті. На відміну від простого копіювання, memmove коректно обробляє ситуації, коли вихідна та цільова ділянки пам'яті перекриваються, що може статися при зсуві масиву "на місці". Це гарантує цілісність даних та запобігає появі непередбачуваних артефактів.

Важливою складовою програми є система валідації даних, яка включає декілька рівнів перевірки. Насамперед, контролюється фізично можливий діапазон значень рН від 0 до 14. Додатково відслідковується швидкість зміни показань між послідовними вимірюваннями, що дозволяє виявляти аномальні стрибки значень. Також постійно контролюється успішність комунікації з сенсором для своєчасного виявлення проблем зв'язку.

Значна увага приділена оптимізації роботи програми. Використання програмних таймерів забезпечує точний контроль періодичності вимірювань без зайвого навантаження на процесор. Кількість звернень до послідовного порту мінімізована для зменшення накладних витрат на комунікацію.

4.3 Підключення Pyroscience OPDOT до ESP32-WROOM-32D

Підключення модуля OPDOT до ESP32-WROOM-32D подане табл. 4.3.

Таблиця 4.3 - Таблиця підключень модуля OPDOT

OPDOT	ESP32-WROOM-32D	Примітки
VDD	3.3V	Живлення датчика, споживання до 30mA
GND	GND	Загальний провід
SCL	GPIO 22	I2C тактування (підтягуючий резистор 4.7 кОм до 3.3V)
SDA	GPIO 21	I2C дані (підтягуючий резистор 4.7 кОм до 3.3V)
INT	GPIO 23	Сигнал переривання від датчика
EN	GPIO 19	Сигнал дозволу роботи датчика

Для надійної роботи датчика розчиненого кисню необхідно забезпечити належне електричне підключення з урахуванням вимог до захисту від завад та

стабільності живлення. На лініях I2C інтерфейсу встановлюються два підтягуючих резистори номіналом 4.7 кОм, які забезпечують коректні логічні рівні сигналів та стабільну роботу шини даних.

Система живлення датчика потребує особливої уваги до фільтрації завад. Безпосередньо біля виводів живлення встановлюється керамічний конденсатор ємністю 0.1 мікрофарад, який забезпечує фільтрацію високочастотних завад. Додатково на лінії живлення монтується LC-фільтр, що складається з індуктивності 10 мікрогенрі та електролітичного конденсатора 10 мікрофарад. Цей фільтр ефективно придушує як високочастотні, так і низькочастотні завади в колі живлення.

При монтажі системи необхідно дотримуватися ряду важливих вимог. Для передачі сигналів I2C слід використовувати екранований кабель, причому його довжина не повинна перевищувати 20 сантиметрів для забезпечення цілісності сигналу. Екран кабелю заземлюється тільки з одного боку - зі сторони мікроконтролера ESP32, що запобігає виникненню паразитних струмів. Особливу увагу слід приділити розведенню плати - сигнальні лінії повинні бути фізично відокремлені від силових для мінімізації наведень. Температурна компенсація показань датчика реалізується програмно через вбудовані алгоритми обробки даних.

Лістинг 4.3 – Підключення Pyroscience OPDOT до ESP32-WROOM-32D

```
#include <Wire.h>
// Адреса I2C датчика OPDOT
#define OPDOT_ADDRESS 0x48
#define SAMPLES_COUNT 7 // Розмір вікна медіанного
// фільтра
// Регістри OPDOT
#define REG_STATUS 0x00 // Регістр статусу
#define REG_DO_MSB 0x01 // Старший байт значення DO
#define REG_DO_LSB 0x02 // Молодший байт значення DO
#define REG_TEMP_MSB 0x03 // Старший байт температури
#define REG_TEMP_LSB 0x04 // Молодший байт температури
#define REG_CONFIG 0x05 // Регістр конфігурації

// Константи для валідації даних
```

```

#define MIN_VALID_DO 0.0           // Мінімальне значення DO
                                   (мг/л)
#define MAX_VALID_DO 20.0          // Максимальне значення DO
                                   (мг/л)
#define MAX_DO_CHANGE 1.0          // Максимальна зміна DO між
                                   вимірюваннями
#define MEASUREMENT_INTERVAL 1000 // Інтервал між вимірюваннями
                                   (мс)

// Піни ESP32
const int PIN_EN = 19;             // Пін дозволу роботи датчика
const int PIN_INT = 23;           // Пін переривання

// Змінні для зберігання даних
float doHistory[SAMPLES_COUNT];    // Буфер історії вимірювань
float lastValidDO = 0.0;           // Останнє валідне значення
float lastTemp = 25.0;             // Остання температура
unsigned long lastMeasurementTime = 0;

void setup() {
    Serial.begin(115200);

    // Налаштування I2C
    Wire.begin();
    Wire.setClock(100000); // Стандартна швидкість 100 кГц

    // Налаштування пінів
    pinMode(PIN_EN, OUTPUT);
    pinMode(PIN_INT, INPUT);

    // Активація датчика
    digitalWrite(PIN_EN, HIGH);
    delay(100); // Затримка на ініціалізацію

    // Ініціалізація масиву історії
    for(int i = 0; i < SAMPLES_COUNT; i++) {
        doHistory[i] = 0.0;
    }

    // Конфігурація датчика
    configureOPDOT();
}

// Функція конфігурації датчика
void configureOPDOT() {
    Wire.beginTransmission(OPDOT_ADDRESS);
    Wire.write(REG_CONFIG);
    Wire.write(0x03); // Налаштування: безперервний режим,
    компенсація температури

```

```

    Wire.endTransmission();
}

// Функція читання значення DO
float readDO() {
    uint16_t raw_do = 0;

    // Читання сирих даних
    Wire.beginTransmission(OPDOT_ADDRESS);
    Wire.write(REG_DO_MSB);
    Wire.endTransmission(false);

    Wire.requestFrom(OPDOT_ADDRESS, 2);
    if(Wire.available() >= 2) {
        raw_do = (Wire.read() << 8) | Wire.read();
    }

    // Конвертація в мг/л
    return raw_do * 0.01; // Коефіцієнт масштабування
}

// Функція читання температури
float readTemperature() {
    uint16_t raw_temp = 0;

    Wire.beginTransmission(OPDOT_ADDRESS);
    Wire.write(REG_TEMP_MSB);
    Wire.endTransmission(false);

    Wire.requestFrom(OPDOT_ADDRESS, 2);
    if(Wire.available() >= 2) {
        raw_temp = (Wire.read() << 8) | Wire.read();
    }

    return raw_temp * 0.01 - 273.15; // Конвертація з К в °C
}

// Функція медіанної фільтрації
float getMedian(float values[], int size) {
    float temp[size];
    memcpy(temp, values, size * sizeof(float));

    // Сортування вставками
    for(int i = 1; i < size; i++) {
        float key = temp[i];
        int j = i - 1;
        while(j >= 0 && temp[j] > key) {
            temp[j + 1] = temp[j];
            j--;
        }
    }
}

```

```

    }
    temp[j + 1] = key;
}

return temp[size / 2];
}

// Функція валідації значення DO
bool isValidDO(float do_value) {
    // Перевірка діапазону
    if(do_value < MIN_VALID_DO || do_value > MAX_VALID_DO) return
false;

    // Перевірка швидкості зміни
    if(abs(do_value - lastValidDO) > MAX_DO_CHANGE) return false;

    return true;
}

// Функція зсуву масиву історії
void shiftHistory(float newValue) {
    memmove(&doHistory[0], &doHistory[1], (SAMPLES_COUNT - 1) *
sizeof(float));
    doHistory[SAMPLES_COUNT - 1] = newValue;
}

void loop() {
    if(millis() - lastMeasurementTime >= MEASUREMENT_INTERVAL) {
        // Зчитування температури для компенсації
        float temp = readTemperature();
        if(temp > -10.0 && temp < 50.0) { // Валідація температури
            lastTemp = temp;
        }

        // Зчитування DO
        float currentDO = readDO();

        if(isValidDO(currentDO)) {
            // Температурна компенсація
            currentDO *= (1 + 0.0235 * (lastTemp - 25.0)); //
Коефіцієнт температурної компенсації

            // Зсув масиву історії та додавання нового значення
            shiftHistory(currentDO);

            // Обчислення медіанного значення
            float filteredDO = getMedian(doHistory, SAMPLES_COUNT);

            // Оновлення останнього валідного значення

```

```

    lastValidDO = filteredDO;

    // Виведення результатів
    Serial.print("Temperature: ");
    Serial.print(lastTemp, 2);
    Serial.print("°C, Raw DO: ");
    Serial.print(currentDO, 3);
    Serial.print(" mg/L, Filtered DO: ");
    Serial.println(filteredDO, 3);
  } else {
    Serial.println("Invalid DO reading detected!");
  }

  lastMeasurementTime = millis();
}
}

```

4.4 Підключення датчика електропровідності Atlas Scientific K 1.0 до ESP32-WROOM-32D

Таблиця 4.4 описує схему підключення модуля Atlas EZO EC до мікроконтролера ESP32-WROOM-32D, де показано відповідність виводів та їх призначення. Для живлення модуля використовується напруга 3.3V із споживанням струму до 15mA, підключена до виводу VCC. Зв'язок здійснюється через UART інтерфейс, де TX модуля підключається до GPIO-16 (RX2), а RX - до GPIO-17 (TX2) мікроконтролера. Для вимірювань електропровідності використовується ЕС-електрод, який підключається через роз'єм BNC до виводу PRB. Загальний провід GND об'єднує схему заземлення обох пристроїв.

Таблиця 4.4 - Таблиця підключень інтерфейсної плати EZO™ EC Circuit

Atlas EZO EC	ESP32-WROOM-32D	Примітки
VCC	3.3V	Живлення схеми, споживання до 15mA
GND	GND	Загальний провід
TX	GPIO 16 (RX2)	UART прийом даних від EZO
RX	GPIO 17 (TX2)	UART передача даних до EZO
PRB	ЕС-електрод	Роз'єм BNC для підключення електрода

Лістинг 4.4 - Підключення датчика електропровідності Atlas Scientific K 1.0 до ESP32-WROOM-32D

```
#include <HardwareSerial.h>

// Визначення констант
#define EZO_SERIAL Serial2
#define MEASUREMENT_INTERVAL 1000           // Інтервал між
вимірюваннями (мс)
#define RESPONSE_TIMEOUT 1000               // Таймаут очікування
відповіді (мс)
#define SAMPLES_COUNT 7                     // Розмір вікна
медіанного фільтра

// Змінні для зберігання даних
float conductivityHistory[SAMPLES_COUNT];    // Буфер для
медіанної фільтрації
float lastValidConductivity = 0.0;
float temperature = 25.0;                    // Температура для
компенсації
unsigned long lastMeasurementTime = 0;

// Ініціалізація послідовного порту для EZO
void setup() {
    Serial.begin(115200);                    // Порт для відладки
    EZO_SERIAL.begin(9600, SERIAL_8N1, 16, 17); // UART2 для
EZO

    delay(1000);                             // Затримка для
ініціалізації EZO

    // Конфігурація EZO EC Circuit
    sendCommand("E\r");                      // Вимкнення неперервного
режиму
    delay(100);
    sendCommand("0,EC,1\r");                  // Увімкнення виведення
електропровідності
    delay(100);
    sendCommand("K,1.0\r");                  // Встановлення константи
датчика
    delay(100);

    // Ініціалізація буфера історії
    for(int i = 0; i < SAMPLES_COUNT; i++) {
        conductivityHistory[i] = 0.0;
    }
}
```

```

// Функція відправки команди на EZ0
void sendCommand(const char* command) {
    EZ0_SERIAL.print(command);
}

// Функція зчитування відповіді від EZ0
String readEZ0Response() {
    String response = "";
    unsigned long startTime = millis();

    while(millis() - startTime < RESPONSE_TIMEOUT) {
        if(EZ0_SERIAL.available()) {
            char c = EZ0_SERIAL.read();
            if(c == '\r') break;
            response += c;
        }
    }
    return response;
}

// Функція отримання значення електропровідності
float readConductivity() {
    // Відправка команди вимірювання з температурною
    // компенсацією
    String command = "R,";
    command += String(temperature);
    command += "\r";
    sendCommand(command.c_str());

    delay(600); // Час на вимірювання

    String response = readEZ0Response();
    if(response.length() > 0) {
        return response.toFloat();
    }
    return -1.0; // Помилка зчитування
}

// Функція медіанної фільтрації
float getMedian(float values[], int size) {
    float temp[size];
    memcpy(temp, values, size * sizeof(float));

    // Сортування вставками
    for(int i = 1; i < size; i++) {
        float key = temp[i];
        int j = i - 1;
        while(j >= 0 && temp[j] > key) {
            temp[j + 1] = temp[j];

```

```

        j--;
    }
    temp[j + 1] = key;
}

return temp[size / 2];
}

// Функція перевірки валідності значення
bool isValidConductivity(float value) {
    // Перевірка діапазону та різкої зміни значень
    return value >= 0.0 && value <= 200000.0 &&
        (lastValidConductivity == 0.0 ||
         abs(value - lastValidConductivity) <
         lastValidConductivity * 0.5);
}

// Функція зсуву масиву історії
void shiftHistory(float newValue) {
    memmove(&conductivityHistory[0], &conductivityHistory[1],
            (SAMPLES_COUNT - 1) * sizeof(float));
    conductivityHistory[SAMPLES_COUNT - 1] = newValue;
}

void loop() {
    if(millis() - lastMeasurementTime >= MEASUREMENT_INTERVAL)
    {
        float currentConductivity = readConductivity();

        if(currentConductivity > 0 &&
        isValidConductivity(currentConductivity)) {
            // Зсув масиву історії та додавання нового значення
            shiftHistory(currentConductivity);

            // Обчислення медіанного значення
            float filteredConductivity =
            getMedian(conductivityHistory, SAMPLES_COUNT);

            // Оновлення останнього валідного значення
            lastValidConductivity = filteredConductivity;

            // Виведення результатів
            Serial.print("Raw EC: ");
            Serial.print(currentConductivity);
            Serial.print(" µS/cm, Filtered EC: ");
            Serial.print(filteredConductivity);
            Serial.print(" µS/cm, Temperature: ");
            Serial.print(temperature);
            Serial.println("°C");
        }
    }
}

```

```

    } else {
        Serial.println("Invalid conductivity reading!");
    }

    lastMeasurementTime = millis();
}
}

```

4.5 Висновки до розділу 4

У розділі розробки програмного забезпечення було детально розглянуто реалізацію програмних модулів для роботи з різними типами датчиків системи моніторингу води. Для кожного датчика розроблено комплексне рішення, що включає схему підключення та програмний код з розширеними можливостями обробки даних.

Розроблене програмне забезпечення для датчика температури DS18B20 реалізує надійну взаємодію через протокол 1-Wire з використанням бібліотек OneWire та DallasTemperature. Особлива увага приділена фільтрації даних через медіанний фільтр з вікном у 5 значень та валідації показань для виявлення некоректних вимірювань. Програма оптимізована для роботи з максимальною роздільною здатністю 12 біт, що забезпечує точність вимірювань до 0.0625°C.

Для рН-електрода Atlas Scientific створено програмний модуль, що забезпечує комунікацію через апаратний UART2 мікроконтролера ESP32. Реалізовано складну систему фільтрації даних з медіанним фільтром у 7 значень та алгоритмом сортування вставками для оптимізації швидкодії. Впроваджено багаторівневу систему валідації даних, що контролює як фізично можливий діапазон значень рН, так і швидкість їх зміни.

Програмне забезпечення для оптичного датчика розчиненого кисню Pyroscience OPDOT реалізує взаємодію через I2C інтерфейс з підтримкою температурної компенсації показань. Розроблено ефективні алгоритми обробки даних, що включають медіанну фільтрацію та валідацію результатів вимірювань.

Програма оптимізована для енергоефективної роботи з контролем періодичності вимірювань.

Для датчика електропровідності Atlas Scientific K 1.0 створено програмний модуль, що забезпечує точні вимірювання з урахуванням температурної компенсації. Реалізовано надійну комунікацію через UART інтерфейс з системою контролю таймаутів та обробкою помилок. Впроваджено ефективні алгоритми фільтрації та валідації даних для забезпечення достовірності вимірювань.

Всі програмні модулі розроблені з використанням сучасних практик програмування, включаючи ефективне управління пам'яттю, оптимізацію продуктивності та надійну обробку помилок. Код написаний на мові C++ з використанням Arduino IDE, що забезпечує оптимальне використання ресурсів мікроконтролера та високу надійність роботи системи.

ВИСНОВКИ

У результаті виконання роботи було розроблено комплексну IoT систему моніторингу якості води для аквакультури, що відповідає сучасним технологічним вимогам та враховує специфіку галузі.

На основі детального аналізу предметної області було визначено ключові параметри води, які потребують постійного моніторингу, включаючи температуру, рівень pH, вміст розчиненого кисню та електропровідність. Дослідження існуючих IoT рішень дозволило виявити основні тенденції розвитку галузі та врахувати найкращі практики при розробці власної системи.

Розроблена чотирирівнева архітектура системи забезпечує повний цикл збору, обробки та аналізу даних. Сенсорний рівень реалізовано у вигляді мережі автономних вимірювальних вузлів з високоточними датчиками. Мережевий рівень, побудований на технології LoRaWAN, забезпечує надійну передачу даних на відстань до 15 км. Серверний рівень здійснює обробку та аналіз даних у реальному часі, а рівень візуалізації надає зручний доступ до інформації через веб-інтерфейс та мобільний додаток.

У роботі було обґрунтовано вибір оптимальних компонентів системи. В якості центрального процесора сенсорних вузлів обрано мікроконтролер ESP32-WROOM-32D, який забезпечує необхідну обчислювальну потужність та має вбудовані засоби бездротового зв'язку. Для вимірювання параметрів води використано високоточні датчики: цифровий температурний датчик DS18B20, pH-електрод Atlas Scientific, оптичний датчик розчиненого кисню Pyroscience OPDOT та датчик електропровідності Atlas Scientific K 1.0.

Особливу увагу приділено розробці енергоефективної системи живлення, що базується на сонячній панелі потужністю 50 Вт та літій-залізо-фосфатному акумуляторі ємністю 280 Ач. Використання контролера заряду Victron Energy SmartSolar MPPT 75/15 забезпечує оптимальне перетворення сонячної енергії та тривалу автономну роботу системи.

Розроблене програмне забезпечення реалізує надійну взаємодію з усіма типами датчиків, включаючи складні алгоритми фільтрації даних та виявлення некоректних показань. Використання медіанної фільтрації та валідації даних забезпечує високу точність вимірювань та стійкість до завад. Програмний код оптимізовано для ефективного використання ресурсів мікроконтролера та тривалої автономної роботи.

Розроблена система може бути впроваджена в аквакультурних господарствах різного масштабу та забезпечить точний моніторинг параметрів води, своєчасне виявлення відхилень та підвищення ефективності виробництва. Модульна архітектура системи дозволяє легко масштабувати її відповідно до потреб конкретного господарства та адаптувати до специфічних умов експлуатації.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Андрющенко А. І., Алимов С. І. Ставовє рибництво. Київ : Видавничий центр НУБіП України, 2020. 285 с.
2. Antonucci F., Costa C. Precision aquaculture: a short review on engineering innovations. *Aquaculture International*. 2020. Vol. 28. P. 41-57.
3. Boyd C. E., Tucker C. S. *Pond Aquaculture Water Quality Management*. Springer Nature, 2022. 324 p.
4. Boyd C. E., Tucker C. S. *Water quality and pond soil analyses for aquaculture*. Auburn : Auburn University Press, 2021. 418 p.
5. Garcia C., Garcia M., McGrath T., Meredith A., Aarup M. Blockchain in Aquaculture. *Blockchain Technology Applications in Businesses and Organizations*. IGI Global, 2021. P. 226-251.
6. Гринжевський М. В., Пекарський А. В. Оптимізація виробництва продукції аквакультури. Київ : Урожай, 2018. 248 с.
7. Гриб О. М., Лобода Н. С., Яров Я. С. Автоматизована система моніторингу гідроекологічного стану водойм рибогосподарського призначення. *Український гідрометеорологічний журнал*. 2020. № 25. С. 93-101.
8. Грициняк І. І., Третяк О. М., Колесник Н. Л. Технології вирощування об'єктів аквакультури. Київ : ІПГ НААН, 2019. 372 с.
9. Jothiswaran V. V., Velmurugan A., Suresh Kumar R. IoT-Based Smart Aquaculture Monitoring System: A Comprehensive Review. *Aquaculture International*. 2022. Vol. 30. P. 1-25.
10. Ковальчук В. В., Шевченко І. А. Інноваційні технології моніторингу якості води в аквакультурі. *Вісник аграрної науки*. 2021. № 5(818). С. 59-67.
11. Колесник Н. Л., Симон М. Ю., Мошнягул К. І. Вплив сполук азоту на фізіологічний стан риб в умовах інтенсивної аквакультури. *Рибогосподарська наука України*. 2021. № 1(55). С. 72-85.

12. Lee P. G., Lea R. N. Internet-based monitoring and control for aquaculture. *Aquaculture Engineering*. Elsevier, 2020. P. 785-815.
13. Lekang O. I. *Aquaculture engineering*. John Wiley & Sons, 2023. 584 p.
14. Li D., Liu S. *Water Quality Monitoring and Management: Basis, Technology and Case Studies*. Academic Press, 2019. 362 p.
15. Лисак В. Ю., Гончар О. М. Сучасні електрохімічні сенсори для моніторингу якості води в аквакультури. *Вісник аграрної науки Причорномор'я*. 2020. № 3. С. 76-83.
16. Марценюк В. П., Потрохов О. С., Зінковський О. Г. Вплив важких металів на фізіолого-біохімічні показники риб в умовах аквакультури. *Гідробіологічний журнал*. 2021. № 57(4). С. 90-104.
17. Parra L., Sendra S., García 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(3). P. 750.
18. Пономаренко Р. В., Плугатар Т. А., Шевченко Р. Ю. Застосування ІоТ технологій для моніторингу якості води в аквакультури. *Вісник Національного університету водного господарства та природокористування*. 2023. № 1(101). С. 201-215.
19. Probst W. N. How emerging data technologies can increase trust and transparency in fisheries. *ICES Journal of Marine Science*. 2020. Vol. 77(4). P. 1286-1294.
20. Проців Г. П., Божик В. Й. Автоматизовані системи контролю якості води у рибництві. *Науковий вісник ЛНУВМБ імені С.З. Гжицького*. 2019. № 21(90). С. 49-54.
21. Siddiqui S. A., Saleem S. Satellite-Based Monitoring and Prediction System for Aquaculture Management. *Machine Learning for Sustainable Development*. Springer, 2021. P. 205-224.
22. Timmons M. B., Ebeling J. M. *Recirculating Aquaculture*. 4th Edition. Ithaca: Ithaca Publishing Company, 2020. 728 p.

23. Христенко Д. С., Котовська Г. О. Біологічні методи оцінки якості води у рибогосподарських водоймах. Рибогосподарська наука України. 2017. № 2(40). С. 39-50.

24. Шевченко П. Г., Халтурин М. Б., Ситник Ю. М. Вплив каламутності води на ріст та розвиток молоді коропових риб. Наукові доповіді НУБіП України. 2022. № 3(97).

25. Шерман І. М., Євтушенко М. Ю. Теоретичні основи рибництва. Київ : Фітосоціоцентр, 2018. 364 с.

26. Про аквакультуру : Закон України від 18.09.2012 р. № 5293-VI. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/5293-17> (дата звернення: 03.12.2024).

27. Водний кодекс України : Закон України від 06.06.1995 р. № 213/95-ВР. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/213/95-вр> (дата звернення: 03.12.2024).

28. ДСТУ 2284:2010. Риба жива. Загальні технічні вимоги. [Чинний від 2012-01-01]. Київ : Держспоживстандарт України, 2010. 16 с.

29. ISO 12878:2012. Environmental monitoring of the impacts from marine finfish farms on soft bottom. URL: <https://www.iso.org/standard/51644.html> (дата звернення: 03.12.2024).

30. Directive 2006/44/EC of the European Parliament and of the Council. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32006L0044> (дата звернення: 03.12.2024).

31. Wurts W. A., Durborow R. M. Interactions of pH, carbon dioxide, alkalinity and hardness in fish ponds. Southern Regional Aquaculture Center Publication. 1992. № 464. P. 1-4.

32. Про затвердження Меж морських районів : Наказ Міністерства захисту довкілля та природних ресурсів України від 05.03.2021 р. № 173. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0423-21> (дата звернення: 03.12.2024).

33. Про затвердження Детальних правил виробництва органічної продукції (сировини) аквакультури : Наказ Міністерства аграрної політики та продовольства України від 30.12.2013 р. № 799. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0240-14> (дата звернення: 03.12.2024).

34. ASC Freshwater Trout Standard Version 1.2. Aquaculture Stewardship Council. 2019. URL: https://www.asc-aqua.org/wp-content/uploads/2019/07/ASC-Freshwater-Trout-Standard_v1.2_final.pdf (дата звернення: 03.12.2024).

35. Про затвердження Правил охорони поверхневих вод від забруднення зворотними водами : Постанова Кабінету Міністрів України від 25.03.1999 р. № 465. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/465-99-п> (дата звернення: 03.12.2024).

36. Про основні принципи та вимоги до безпечності та якості харчових продуктів : Закон України від 23.12.1997 р. № 771/97-ВР. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/771/97-вр> (дата звернення: 03.12.2024).