

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Комп'ютерної інженерії та управління
(повна назва)

Кафедра Автоматизації проектування обчислювальної техніки
(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
Пояснювальна записка

рівень вищої освіти другий (магістерський)

Програмно-апаратна система дослідження екологічного стану водного
середовища
(тема)

Виконав: здобувач другого року навчання,
групи СКСм-23-2 Подворний В.Г.
(прізвище, ініціали)

Спеціальність 123 – Комп'ютерна інженерія
(код і повна назва спеціальності)


Тип програми освітньо-професійна
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма Спеціалізовані
комп'ютерні системи
(повна назва освітньої програми)

Керівник доцент Рожнова Т.Г.
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри


(підпис)


Чумаченко С.В.
(прізвище, ініціали)

2025 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Комп'ютерної інженерії та управління
Кафедра Автоматизації проектування обчислювальної техніки
Рівень вищої освіти другий (магістерський)
Спеціальність 123 – Комп'ютерна інженерія
Тип програми Освітньо-професійна
Освітня програма Спеціалізовані комп'ютерні системи

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри 
(підпис)

« 02 » 09 2024 р.

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

здобувачеві Подворному Володимиру Тарасовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Програмно-апаратна система дослідження екологічного стану водного середовища

затверджена наказом університету від « 08 » 11 2024 р. № 1282 Ст

2. Термін подання здобувачем роботи до екзаменаційної комісії 22 01 2025 р.

3. Вихідні дані до роботи _____

Мікроконтролер Arduino Uno

Датчик DS18B20, HC-SR04, pH, TDS

Дисплей LCD 1602 з модулем I2C/PC

Мова програмування Arduino C

Середовища розробки Arduino IDE

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі _____

Аналіз предметної області та постановка завдання

Аналіз існуючих систем моніторингу водного середовища

Дослідження принципу роботи систем моніторингу якості води

Аналіз методів і алгоритмів систем дослідження водного середовища

Розробка апаратно-програмної системи

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (п.5 включається до завдання за рішенням випускової кафедри) _____
17 слайдів

6. Консультанти розділів роботи (п.6 включається до завдання за наявності консультантів згідно з наказом, зазначеним у п.1)

| Найменування розділу | Консультант (посада, прізвище, ім'я, по батькові) | Позначка консультанта про виконання розділу | |
|----------------------|---|---|------|
| | | підпис | дата |
| | | | |
| | | | |

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

| № | Назва етапів роботи | Терміни виконання етапів роботи | Примітка |
|---|---|---------------------------------|----------|
| 1 | Отримання завдання | 02.09.2024 - 10.09.2024 | |
| 2 | Аналіз проблемної галузі, постановка задачі, вибір інструментальних засобів | 11.09.2024 – 24.10.2024 | |
| 3 | Проектування досліджуваної системи | 24.10.2024 – 10.11.2024 | |
| 4 | Реалізація апаратно-програмної системи | 10.11.2024 – 01.12.2024 | |
| 5 | Проведення експериментів | 01.12.2024 – 07.12.2024 | |
| 6 | Збір даних | 07.12.2024 – 10.12.2024 | |
| 7 | Оформлення пояснювальної записки | 10.12.2024 – 30.12.2024 | |
| 8 | Перевірка роботи керівником | 01.01.2025 – 15.01.2025 | |
| 9 | Подання роботи в ЕК до захисту | 15.01.2025 – 25.01.2025 | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |

Дата видачі завдання 02 вересня 2024 р.

Здобувач Вме
(підпис)

Керівник роботи _____
(підпис)

доцент каф. АПОТ Рожнова Т.Г.
(посада, прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка кваліфікаційної роботи містить: 58 сторінок, 29 рисунків, 14 джерел посилання.

МІКРОКОНТРОЛЕР, СИСТЕМА, РОЗРОБКА, ДОСЛІДЖЕННЯ, АНАЛІЗ, МОНІТОРИНГ, АЛГОРИТМ, ВОДНЕ СЕРЕДОВИЩЕ, TDS, PH, ТЕМПЕРАТУРА.

Метою кваліфікаційної роботи є розробка власної програмно-апаратної системи для дослідження екологічного стану водного середовища.

Об'єктом дослідження є система дослідження екологічного стану водного середовища.

Предметом дослідження є апаратні та програмні методи та засоби розробки систем дослідження екологічного стану водного середовища.

У ході кваліфікаційної роботи було проведено аналіз існуючих на ринку систем. Досліджено методи та алгоритми роботи програмно-апаратних систем, що дозволило обрати складові для розробки власної програмно-апаратної системи для дослідження екологічного стану водного середовища. Було обрано компонентну базу для реалізації необхідного функціоналу, створено функціональну та структурну схему системи.

Розроблена система може бути використана у екологічних моніторингових системах, таких як заповідники чи водні ресурси, для контролю якості води та моніторингу змін в екологічному стані водного середовища, а також для запобігання забрудненню та порушенню екологічних норм.

ABSTRACT

The explanatory note of the qualification paper contains: 58 pages, 29 figures, 14 references.

MICROCONTROLLER, SYSTEM, DEVELOPMENT, RESEARCH, ANALYSIS, MONITORING, ALGORITHM, AQUATIC ENVIRONMENT, TDS, PH, TEMPERATURE.

The goal of the qualification work is the development of a custom hardware and software system for studying the ecological state of the aquatic environment. The object of the research is a system for studying the ecological state of the aquatic environment.

The subject of the research is the hardware and software methods and tools for developing systems to study the ecological state of the aquatic environment.

As part of the qualification work, an analysis of existing market systems was conducted. Methods and algorithms of operation for hardware and software systems were studied, enabling the selection of components for the development of a custom hardware and software system for investigating the ecological state of the aquatic environment. A component base was selected to implement the required functionality, and the functional and structural diagrams of the system were created.

The developed system can be used in ecological monitoring systems, such as nature reserves or water resources, to control water quality and monitor changes in the ecological state of the aquatic environment, as well as to prevent pollution and violations of environmental standards.

ЗМІСТ

| | |
|---|----|
| ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІННІВ..... | 8 |
| ВСТУП..... | 9 |
| 1 АНАЛІЗ ПРОБЛЕМИ ТА ПОСТАНОВКА ЗАВДАННЯ..... | 11 |
| 1.1 Визначення важливості проблеми..... | 11 |
| 1.2 Аналіз існуючих рішень | 12 |
| 1.3 Мета та постановка завдання..... | 19 |
| 2 МЕТОДИ ТА АЛГОРИТМИ СИСТЕМ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕКОЛОГІЧНОГО СТАНУ ВОДНОГО СЕРЕДОВИЩА..... | 20 |
| 2.1 Методи дослідження систем управління якістю води..... | 20 |
| 2.2 Алгоритми оцінювання та моніторингу систем екологічного стану водних ресурсів..... | 24 |
| 3 РОЗРОБКА АПАРАТНОЇ ЧАСТИНИ ПРОЕКТУ..... | 29 |
| 3.1 Розробка структурної та функціональної схеми..... | 29 |
| 3.1.1 Розробка структурної схеми..... | 29 |
| 3.1.2 Розробка функціональної схеми..... | 30 |
| 3.2 Складові мікроконтролерної системи для дослідження середовища..... | 32 |
| 3.2.1 Центральний мікроконтролер Arduino Uno..... | 32 |
| 3.2.2 Датчики відстані HC-SR04, температури DS18B20, pH, TDS... | 33 |
| 3.2.3 Дисплей LCD 1602 з модулем I2C/ПС..... | 36 |
| 3.3 Канали зв'язку..... | 37 |
| 3.4 Протоколи зв'язку..... | 39 |
| 4 РОЗРОБКА ПРОГРАМНОЇ ЧАСТИНИ ПРОЕКТУ..... | 41 |
| 4.1 Середовище розробки проекту..... | 41 |
| 4.2 Програмна розробка системи..... | 42 |
| 4.2.1 Налаштування системи проекту..... | 42 |

| | |
|---|----|
| 4.2.2 Налаштування температури DS18B20..... | 44 |
| 4.2.3 Налаштування датчики відстані HC-SR04..... | 45 |
| 4.2.4 Налаштування датчика Ph..... | 48 |
| 4.2.5 Налаштування датчика TDS..... | 49 |
| 4.2.6 Налаштування дисплея LCD 1602 з модулем I2C/ПС..... | 49 |
| 4.3 Інтеграції методу поєднання системного аналізу з математичним.. | 50 |
| 4.4 Тестування проекту..... | 51 |
| ВИСНОВКИ..... | 55 |
| ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ..... | 57 |
| ДОДАТОК А..... | 59 |
| ДОДАТОК Б..... | 68 |

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

IoT – Internet of Things – інтернет речей, мережа фізичних пристроїв, які підключені до Інтернету для збору, обміну та обробки даних

IDE – Integrated Development Environment – інтегроване середовище розробки, програмне забезпечення для створення, тестування та налагодження програм

SPI – Serial Peripheral Interface – це високошвидкісний протокол зв'язку, що використовує чотири лінії

UART – (Universal Asynchronous Receiver-Transmitter) – послідовний протокол

АПС – Апаратно-програмна система – комплекс апаратних засобів і програмного забезпечення, що працюють разом для виконання певних задач, таких як збір, обробка та аналіз даних

ІМ – Алгоритм імітаційних моделей – створений на математичних або комп'ютерних моделях, які відтворюють реальні процеси у водних об'єктах для прогнозування їх стану в різних умовах

СДЗ – Системи дистанційного зондування – програмні системи для збору, зберігання, обробки, аналізу та візуалізації географічних даних

СМ – Система моніторингу – система, що здійснює спостереження за певним процесом або об'єктом, в даному випадку – за екологічним станом водного середовища.

ВСТУП

Сучасні технології сприяють швидкому розвитку систем для дослідження водного середовища, що відкриває нові можливості у таких галузях, як екологія, аквакультура, водопостачання, та охорона навколишнього середовища. Ці системи здатні збирати та аналізувати дані про стан води, включаючи параметри якості, рівень забруднення, концентрацію різних хімічних елементів і показники біологічної активності. Застосування таких рішень дозволяє не лише покращити моніторинг якості води, але й вчасно виявляти забруднення та зміни, що можуть мати негативний вплив на екосистеми.

Високоточні сенсори, такі як рН-метри, TDS-метри, температурні датчики та інші, дозволяють отримувати точні та достовірні дані для аналізу. Інтеграція таких сенсорів у комплексні системи дозволяє збирати великі масиви даних, на основі яких можна будувати прогнози та оцінювати вплив різних факторів на водне середовище. Крім того, автоматизація цих систем дозволяє здійснювати постійний моніторинг у реальному часі, що є важливим для оперативного реагування на критичні ситуації та збереження екологічної рівноваги.

Особливо важливим є розвиток бездротових сенсорних мереж (WSN), які застосовуються для моніторингу води в реальному часі. З використанням таких систем можна не лише виявляти забруднення на ранніх стадіях, але й забезпечити більш ефективне управління водними ресурсами завдяки інтеграції з іншими інформаційними системами для прогнозування майбутніх змін.

Проте, незважаючи на значний прогрес, у цій сфері існують також виклики, зокрема, пов'язані з точністю, стабільністю та довговічністю сенсорів, а також обробкою та збереженням великих обсягів даних. Дослідження і розробка нових алгоритмів для обробки інформації та

покращення конструкцій сенсорів сприятиме вдосконаленню систем моніторингу та дозволить досягти ще вищого рівня надійності в оцінці стану водного середовища.

Впровадження таких систем має вирішальне значення для забезпечення сталого розвитку водних екосистем і збереження природних ресурсів, а також для зниження ризиків забруднення та покращення екологічної ситуації в глобальному масштабі.

1 АНАЛІЗ ПРОБЛЕМИ ТА ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

У розділі розглянуто поняття системи дослідження водного середовища, основні види цих систем, переваги та недоліки їх, визначено мету та постановку завдання.

1.1 Визначення важливості проблеми

Сучасні системи для дослідження водного середовища є однією з найбільш перспективних і швидко розвиваючих галузей технологій, що поєднує передові рішення у сфері екологічного моніторингу та обробки великих даних. Ці системи забезпечують високоточне вимірювання параметрів водного середовища, включаючи якість води, їх хімічний склад, біологічну активність та рівень забруднення. Їх використання дуже важливе значення для екології, водопостачання, рибного господарства та багатьох інших сфер, що залежать від якісного моніторингу водних ресурсів.

Використання подібних систем охоплює багато сфер. Наприклад, у галузі екологічного моніторингу вони сприяють виявленню забруднень, що забезпечує своєчасне реагування на екологічні загрози. У рибництві та аквакультурі такі датчики допомагають підтримувати сприятливе середовище для життя риб і водних організмів. Також у системах водопостачання ці технології дають змогу відстежувати якість води, яка потрапляє до споживачів, що є ключовим для збереження здоров'я населення.

Розвиток цих технологій базується на застосуванні високоточних сенсорів, здатних фіксувати важливі параметри, такі як рівень рН, TDS (загальна кількість розчинених речовин), температура та кисневий баланс води. Інтеграція сенсорів із сучасними технологіями передачі даних і хмарними системами дозволяє забезпечувати безперервний моніторинг стану води у реальному часі. Це дає змогу вчасно виявляти проблеми, як-от

забруднення чи зміни хімічного складу води, які можуть негативно впливати на екосистеми.

Незважаючи на суттєвий прогрес, розробка систем для моніторингу водного середовища залишається складним завданням. Головні виклики включають підвищення точності, стабільності та довговічності сенсорів, а також оптимізацію обробки великих даних для точного прогнозування стану води. Додатково, важливим аспектом є створення моделей, які можуть ідентифікувати аномалії та оцінювати ризики для водного середовища з урахуванням різних чинників [2].

1.2 Аналіз існуючих рішень

Існують різні типи систем для дослідження екологічного стану водного середовища. Розглянемо деякі з них.

Система локально апаратно-програмних комплексів (рис. 1.1). Вона працює за принципом збору даних із використанням датчиків, які реагують фізико-хімічні параметри водного середовища, таких як температура, рН, електропровідність.

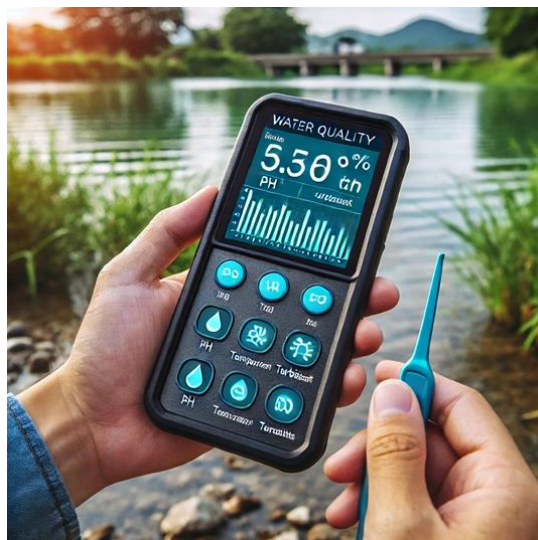


Рисунок 1.1 – Системи локальні апаратно-програмні комплекси

Алгоритм роботи системи базується на кількох етапах. Спершу дані від сенсорів проходять аналогово-цифрове перетворення, що дозволяє отримати цифрові значення фізичних параметрів. Результати вимірювань можуть передаватися на локальний дисплей для аналізу або до зовнішніх пристроїв. Така система має переваги, як високу точність і стабільність вимірювань, швидкість отримання результатів, а також можливість автономної роботи. Однак є й недоліки, серед яких залежність від якості сенсорів, необхідність регулярного калібрування та обслуговування, а також потенційно висока вартість компонентів. Система використовує математичний метод та алгоритм математичних детермінованих моделей [4].

Автоматизовані системи моніторингу (рис. 1.2). Вони функціонують за принципом безперервного збору та аналізу даних у режимі реального часу. Вони оснащуються набором сенсорів, які можуть одночасно вимірювати різні параметри, включаючи концентрацію металів, нітратів і фосфатів. Дані з сенсорів надходять у центральний обчислювальний модуль, де вони аналізуються за допомогою вбудованих алгоритмів та в подальшому оптимізують середовище.



Рисунок 1.2 – Автоматизовані системи моніторингу

Перевагою систем є безперервний характер роботи, висока точність вимірювань, можливість інтеграції з інформаційними системами та зручність в експлуатації. Водночас недоліками є залежність від енергозабезпечення,

висока початкова вартість та необхідність регулярного технічного обслуговування для підтримання належної точності сенсорів і системи загалом. Система використовує математичний метод та алгоритм оптимізованих моделей [3].

Системи для екстреного моніторингу (рис. 1.3). Вони призначені для оперативного виявлення забруднень води в аварійних ситуаціях, наприклад, у разі промислових викидів або розливу нафтопродуктів. Такі системи зазвичай оснащені високоточними сенсорами та портативними пристроями для аналізу токсичних речовин, зокрема важких металів і нафтопродуктів. Принцип роботи цих систем базується на використанні швидких аналітичних методів, таких як спектрофотометрія чи електрохімічний аналіз, які дозволяють отримувати результати в максимально короткі терміни. Дані одразу обробляються вбудованим обчислювальним модулем або передаються до центра управління для подальшого аналізу. Перевагами таких систем є їхня оперативність, здатність функціонувати в автономному режимі та висока чутливість до небезпечних речовин. Недоліки включають обмежений спектр параметрів, які можуть бути проаналізовані одночасно, залежність від точного налаштування обладнання. Система використовує математичний метод та алгоритм імітаційних моделей [7].



Рисунок 1.3 – Системи для екстреного моніторингу

Системи дистанційного зондування (рис. 1.4). Вони базуються на використанні супутникових технологій для моніторингу фізико-хімічних характеристик поверхневих вод великих водойм. Принцип роботи цих систем полягає у зборі інформації за допомогою супутників, які оснащені спектральними сенсорами. Вони аналізують відбиття сонячного світла від водної поверхні у різних діапазонах електромагнітного спектра. Ці дані передаються на наземні станції, де проходять обробку за допомогою алгоритмів обчислення необхідних показників. Головними перевагами СДЗ є здатність охоплювати великі акваторії за короткий час, відсутність потреби у фізичному доступі до об'єкта моніторингу та можливість відстеження змін у динаміці. Проте такі системи мають і недоліки, як обмежена точність даних у порівнянні з локальними вимірюваннями. Система використовує статистичний метод в поєднанні з математичними моделями для швидкої обробки даних та алгоритм імітаційних моделей [6].



Рисунок 1.4 – Системи дистанційного зондування

Інноваційні системи на базі IoT (рис. 1.5). Вони використовують мережу «розумних» датчиків, які інтегруються у структуру інтернету речей (IoT), забезпечуючи моніторинг та аналіз якості води у режимі реального часу. Ці датчики розташовуються безпосередньо у водоймах і можуть вимірювати параметри, такі як температура, рівень кисню, рН, концентрація хімічних

сполук чи інших забруднювачів. Принцип роботи систем IoT включає збір даних за допомогою сенсорів, їх передачу через інтернет до хмарного сервера, де вони зберігаються та аналізуються. На основі отриманих даних система може автоматично генерувати попередження щодо можливих екологічних загроз, таких як витік небезпечних речовин чи зниження рівня кисню у воді, а також прогнозувати динаміку змін. Перевагами таких систем є висока автоматизація, оперативність у передачі та аналізі даних. Недоліками є висока вартість обладнання, складність в обслуговуванні мережі датчиків, необхідність стабільного інтернет-з'єднання та підвищена чутливість до кібератак або збоїв у передачі даних. Система використовує математичний та статистичний метод та алгоритм індикаторних показників [9].



Рисунок 1.5 – Інноваційні системи на базі IoT

У нашому випадку ми будемо використовувати першу систему, а саме система локально апаратно-програмних комплексів. Тому детальніше розглянемо існуючі рішення таких систем.

Першим прикладом є прилад для занурення воду Seneeye Home Aquarium Monitor (рис. 1.7). Акваріумний монітор Seneeye Home – це інноваційний пристрій, призначений для допомоги у моніторингу та підтримці здоров'я акваріумів на оптимальному рівні. Завдяки постійному й точному контролю ключових параметрів води, цей монітор дозволяє своєчасно виявляти

потенційні проблеми до їх загострення, забезпечуючи безпеку та комфорт для риб і інших водних мешканців.



Рисунок 1.7 – Seneeye Home Aquarium Monitor

Моніторинг параметрів води за допомогою Seneeye Home здійснюється безперервно, охоплюючи ключові показники, такі як рН, що відображає рівень кислотності або лужності води й має критичне значення для здоров'я риб. Також пристрій вимірює рівень вільного амоніаку (NH_3), який є токсичним навіть у малих концентраціях, температуру, що дозволяє уникати небезпечних перепадів, та інтенсивність освітлення, важливу для росту рослин і комфорту риб. У разі виявлення небезпечних рівнів або відхилень Seneeye Home миттєво надсилає сповіщення на смартфон або комп'ютер, що дає можливість оперативно реагувати [8].

Переваги системи:

- може працювати як в морських так і прісноводних акваріумах;
- легкість встановлення та використання;
- сповіщення в реальному часі;
- запис та аналіз даних.

Недоліки системи:

- залежність від інтернет-з'єднання;
- обмеження параметрів, що вимірюються;

– обслуговування датчиків.

Другим прикладом є Neptune Systems APEX (рис. 1.8). Neptune Systems APEX – це інноваційна система моніторингу та управління акваріумами, створена для вимогливих акваріумістів, незалежно від того, чи є вони аматорами, чи професіоналами. APEX дозволяє контролювати й регулювати ключові параметри води, автоматизувати роботу акваріумного обладнання та забезпечує зручний дистанційний доступ через мобільні додатки або веб-інтерфейс [10].



Рисунок 1.8 – Neptune Systems APEX

APEX дозволяє автоматизувати різне обладнання акваріума, включаючи освітлення для налаштування циклів дня і ночі, насоси та піноутворювачі для регулювання циркуляції води та функціонування іншого обладнання, дозатори добавок для точного внесення кальцію та мікроелементів, а також системи фільтрації для забезпечення ефективного очищення води.

Система APEX має модульну структуру, що дозволяє її розширення за допомогою додаткових компонентів, таких як модулі PM1, PM2 і PM3 для підключення додаткових зондів, модуль виявлення витоків для попередження затоплень, а також модулі управління озоном і CO₂ для більш складних систем, що вимагають спеціалізованого контролю [12].

Переваги системи:

– точний моніторинг;

- автоматизація;
- зв'язок.

Недоліки системи:

- вартість;
- складність;
- обслуговування.

1.3 Мета та постановка завдання

Метою кваліфікаційної роботи є розробка власної програмно-апаратної системи для дослідження екологічного стану водного середовища.

Об'єктом дослідження є система дослідження екологічного стану водного середовища.

Предметом дослідження є апаратні та програмні методи та засоби розробки систем дослідження екологічного стану водного середовища.

Згідно з поставленою метою визначено наступні завдання:

- аналіз сучасних систем для дослідження водного середовища. Дослідження моделей та методів їх роботи. Виділення їх недоліків та переваг;
- аналіз та вибір мікроконтролеру і компонентів, що входять складовими до системи дослідження водного середовища;
- розробка функціональної схеми проекту;
- розробка структурної схеми проекту;
- аналіз, вибір мов програмування та середовища розробки мікроконтролера;
- розробка апаратної частини проекту;
- розробка програмного забезпечення мікроконтролера;
- тестування розробленої системи дослідження екологічного стану водного середовища.

2 МЕТОДИ ТА АЛГОРИТМИ СИСТЕМ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕКОЛОГІЧНОГО СТАНУ ВОДНОГО СЕРЕДОВИЩА

У другому розділі розглянуто використання методів і алгоритмів систем дослідження екологічного стану водного середовища у різних галузях, а також переваги та недоліки їхнього застосування для забезпечення системою ефективного моніторингу та управління водними ресурсами.

2.1 Методи дослідження систем управління якістю води

Для дослідження систем управління якістю води використовуються різноманітні методи, що забезпечують ефективне управління та підтримання високих стандартів якості систем водних ресурсів.

Першим є метод системного аналізу. Він слугує основою для створення ефективних систем контролю якості водних ресурсів. Завдяки йому екосистему водних об'єктів можна розглядати як комплексну, взаємопов'язану систему, яка охоплює фізичні, хімічні, біологічні та соціально-економічні елементи. Системний підхід використовується системою для оцінки стану водних об'єктів, визначення джерел забруднення та розробки стратегій для мінімізації негативного впливу. Цей аналіз дозволяє виявляти зв'язки між впливом людської діяльності та якістю води, що сприяє прогнозуванню можливих наслідків господарської діяльності [1]. Математичний апарат цього методу:

$$\frac{dX}{dt} = A \cdot X + B \cdot U, \quad (2.1)$$

де X – вектор стану системи (наприклад, параметри якості води: рН, TDS, температура), A – матриця взаємозв'язків між параметрами, U – вектор

зовнішніх впливів (наприклад, обсяг скидів забруднень), В – матриця впливу зовнішніх факторів.

Перевагами цього методу є:

- можливість отримання системі глобальне бачення екосистеми водних об'єктів;
- спрощення процесу системі прогнозувати вплив антропогенних факторів на якість води;
- можливість допомогти системі в плануванні стратегій для збереження та покращення стану водних ресурсів.

Недоліком методу є:

- висока складність реалізації, що потребує великих обсягів даних;
- можливість бути важким для застосування без достатньої кількості точних даних і без належної експертизи.

Другими методами для дослідження систем управління якістю води є математичні та обчислювальні методи моделювання. Математичне моделювання дозволяє створювати цифрові копії водних систем для оцінки їхнього стану та прогнозування змін.

Моделі математичного методу бувають такими.

Детерміновані моделі. Вони використовуються системою для опису фізико-хімічних і біологічних процесів у водному середовищі.

Індикаторних показників моделі. Вони враховують фактори в системі, які можуть вплинути на забезпечення життя водним організмам завдяки наявності розчиненого кисню.

Оптимізаційні моделі. Використовуються для вибору найкращих стратегій управління водними ресурсами, включаючи мінімізацію витрат та максимізацію ефективності заходів.

Імітаційні моделі. Дозволяють моделювати сценарії розвитку подій, наприклад, у разі аварійного забруднення водних об'єктів.

Цей метод має перевагу в точності прогнозування, можливості моделювання сценаріїв і широкому застосуванні в управлінні водними

ресурсами, що сприяє оптимізації рішень. Недоліком є висока потреба в обчислювальних ресурсах та необхідність експертного нагляду.

Третім методом контролю води є статистичний. За допомогою статистичних методів аналізується великий обсяг даних про якість води, зібраних системою під час моніторингу. Вони дозволяють виявити взаємозв'язки між різними показниками якості води. Крім того, ці методи забезпечують оцінку варіацій якості у різних точках моніторингу, визначають ймовірність перевищення допустимих норм забруднення та прогнозують зміни якості води на основі наявних історичних даних. Математичний апарат цього методу:

$$P(t) = \bar{P} + \sum_{k=1}^m a_k \cdot \sin(T \cdot 2\pi kt), \quad (2.2)$$

де $P(t)$ – значення показника (наприклад, рН, TDS) у момент часу t , \bar{P} – середнє значення показника за період k -ої гармоніки (визначає величину коливань), k – номер гармоніки (основна $k=1$, вищі $k=2,3,\dots$), t – час (у днях, годинах або секундах), T – період коливань (наприклад, $T=365$ для сезонних змін), 2π – кутова частота (стандартний множник для тригонометричних функцій).

Перевагою цього методу є:

- можливість аналізувати великі обсяги даних, що дозволяє виявляти закономірності та зв'язки;
- підходить для аналізу результатів моніторингу та оцінки варіацій у стані води;
- дає можливість прогнозування змін якості води на основі історичних даних.

Недоліком цього методу є:

- надмірна залежність від якості вхідних даних;

– неможливість врахування факторів, які можуть бути важливими, але не були включені в аналіз, наприклад, специфічні фізико-хімічні процеси або неочікувані випадкові впливи.

Отже, проаналізувавши методи дослідження систем управління якістю води було зроблено висновок, що найкращим методом є системний аналіз, якщо потрібен взаємозв'язок між різними факторами, оскільки він дозволяє оцінити всю систему та її компоненти. Але для точних обчислень та оцінок розвитку ситуацій математичне моделювання є найкращим вибором. Но якщо мета полягає в аналізі великої кількості даних та виявленні закономірностей у даних моніторингу, то статистичний метод може бути найбільш підходящим.

Проаналізувавши методи роботи систем дослідження водного середовища запропоновано новий метод, який поєднує системний аналіз і математичний метод з детермінованою моделлю, що дає можливість отримати математичні моделі для усунення відносної похибки значень параметрів системи, що є підвищує якість аналізу.

Для обчислення точного значення параметру рН використовується наступний вираз:

$$pH_c = pH_B - \beta \cdot (\text{Температура} - 20) - \gamma \cdot (TDS_B - TDS_p), \quad (2.4)$$

де pH_c – скориговане значення рівня кислотності, pH_B – виміряне значення рівня кислотності, β – температурний коефіцієнт впливу на рН, Температура – температура рідини під час вимірювання, 20 – референсна температура, γ – коефіцієнт впливу TDS на рН, TDS_B – виміряне значення загального вмісту розчинених речовин, TDS_p – референсне значення загального вмісту розчинених речовин.

Обчислення точного значення параметру TDS здійснюється виразом:

$$TDS_c = TDS_B - \alpha \cdot (\text{Температура} - 20) + \delta \cdot (pH_B - pH_p), \quad (2.5)$$

де TDS_c – скориговане значення загального вмісту розчинених речовин, TDS_B – виміряне значення загального вмісту розчинених речовин, α – температурний коефіцієнт, Температура – температура рідини під час вимірювання, 20 – референсна температура, δ – коефіцієнт впливу рівня рН, рН – виміряне значення рівня кислотності, рН_р – референсне значення рівня кислотності.

2.2 Алгоритми оцінювання та моніторингу систем екологічного стану водних ресурсів

Для оцінювання та моніторингу динаміки екологічного стану водних об'єктів використовуються різноманітні алгоритми та моделі, що забезпечують ефективне управління водними ресурсами.

Першим прикладом є алгоритм оптимізаційних моделей. Він використовується для визначення оптимальної стратегії управління водними ресурсами та планування водоохоронних заходів [1].

Принцип роботи оптимізаційних моделей полягає в пошуку найефективніших рішень для системи управління водними ресурсами з урахуванням екологічних, економічних та соціальних аспектів. Для цього використовуються дані про якість води, обсяги скидів, кліматичні особливості та інші важливі параметри. Перед розрахунками дані проходять етап попередньої обробки для підвищення їхньої точності. Алгоритм здійснює пошук рішень, які відповідають заданим критеріям оптимальності. Після цього проводиться числове моделювання для вибору найбільш ефективного сценарію управління. Оптимальне рішення піддається оцінці на предмет доцільності його впровадження. Для врахування кількох цілей одночасно, наприклад, мінімізацію витрат і максимізацію якості води використовується така формула:

$$Z = \alpha \cdot \sum_{i=1}^n c_i \cdot x_i - \beta \cdot Q(x), \quad (2.6)$$

де – α і β вагові коефіцієнти (визначають пріоритет кожної мети), а $Q(x)$ – функція якості води (наприклад, зниження концентрації забруднень).

Переваги цього алгоритму:

- можливість враховувати екологічні, економічні та соціальні фактори при прийнятті рішень;
- підходить для планування довгострокових заходів з управління системою водними ресурсами та водоохоронних стратегій.

Недоліки цього алгоритму:

- для коректних результатів потрібні точні та надійні дані про водні ресурси, які можуть бути важко доступними;
- створення математичних моделей, які відображають реальні умови, може бути складним і вимагати високих обчислювальних ресурсів;
- потребує значних обчислювальних потужностей, а також часу на розрахунки та тестування сценаріїв.

Другим прикладом є алгоритм імітаційних моделей. Він застосовується системою для прогнозування довгострокових змін у водних ресурсах і оперативного управління у випадках надзвичайних ситуацій.

Принцип роботи імітаційних моделей ґрунтується на створенні математичних або комп'ютерних моделей, які відтворюють реальні процеси у водних об'єктах для прогнозування їхнього стану в різних умовах.

Імітаційні моделі дозволяють будувати сценарії розвитку подій, наприклад, у випадку аварійного забруднення чи техногенної катастрофи.

Вони враховують рух води, її течії, швидкість і напрямок, що допомагає зрозуміти, як забруднювальні речовини будуть поширюватися у водоймі. Під час моделювання беруться до уваги такі процеси, як розчинення, осадження, адсорбція та хімічні реакції між забрудниками і компонентами водного середовища.

Імітаційні моделі дозволяють оперативно оновлювати дані в режимі реального часу, що забезпечує можливість коригування сценаріїв відповідно до поточних умов [1].

Математичний апарат цієї моделі:

$$x_{t+1} = x_t + \Delta x_t, \quad (2.7)$$

де x_{t+1} – значення параметра в наступний момент часу, x_t – значення параметра зараз, Δx_t – зміна параметра за одиницю часу.

Переваги цього алгоритму:

- можливість прогнозування системою різних сценаріїв розвитку водних об'єктів за різних умов;
- дозволяє системі оцінити наслідки природних і антропогенних впливів на водні екосистеми;
- може використовуватися для оперативного управління у випадках надзвичайних ситуацій, забезпечуючи адаптацію до змінних умов;
- здатність відтворювати реальні ситуації, зокрема для аналізу поширення забруднення у разі катастроф.

Недоліки цього алгоритму:

- для точного прогнозування необхідні великі обсяги складних даних, що можуть бути важко доступними;
- неточність даних, що використовуються для моделювання, може призвести до помилкових результатів;
- значних обчислювальних потужностей для проведення числових симуляцій та моделювання реальних сценаріїв.

Третім прикладом є алгоритм індикаторних показників. Цей алгоритм моделює динаміку розчиненого кисню (РК) та біохімічного споживання кисню (БСК) у водних об'єктах. Для його роботи необхідно знати рівень розчиненого кисню (РК), який потрібен для підтримки життєдіяльності водних організмів, а також концентрацію органічних речовин (БСК), що розкладаються бактеріями за допомогою кисню.

Принцип роботи алгоритму полягає в оцінці ступеня аерації води та здатності водойми забезпечувати життя водним організмам завдяки наявності розчиненого кисню. Окрім того, алгоритм враховує процес реаерації, коли кисень з атмосфери надходить у воду, компенсуючи його недостачу. Математичний апарат цього алгоритму:

$$DO = DO_{\text{макс}} - \frac{BOD_5 \cdot k}{1 + k \cdot t}, \quad (2.8)$$

де $DO_{\text{макс}}$ – максимальне значення розчиненого кисню, BOD_5 – біохімічне споживання кисню за 5 діб, k – коефіцієнт самоочищення, t – час у добах.

Переваги:

- дає можливість оцінити здатність водних об'єктів до самоочищення, що є важливим для підтримки екологічної рівноваги;
- дозволяє здійснити оцінку стану води без необхідності в складних обчисленнях і складних вхідних даних;
- дозволяє точно визначити рівень забруднення води, що є важливим для подальшого управління.

Недоліки:

- використовується переважно для аналізу розчиненого кисню та біохімічного споживання кисню, тому не враховує всіх факторів, що можуть впливати на якість води;
- не може повністю охопити всі можливі забруднювачі та біохімічні процеси в екосистемі.

Четвертим прикладом є алгоритм детермінованих моделей. Вони є ключовими сигналами дослідження системи про стан водного середовища.

Принцип цього алгоритму полягає можливість системі дослідження водних ресурсів. Вимірювання здійснюються автоматизованими датчиками, які забезпечують безперервний моніторинг. Дані детермінованої моделі збираються як автоматизованими системами. Отримані результати

аналізуються для виявлення відхилень від нормативних значень. Математичний апарат цієї моделі:

$$f(x, t) = \frac{dx}{dt}, \quad (2.9)$$

де x – параметр, що змінюється, t – час, а $f(x,t)$ – функція, яка визначає зміну параметра залежно від часу.

Переваги цього алгоритму:

- дає можливість системі оцінити здатність водних об'єктів до екологічної рівноваги параметрів;
- дозволяє системі здійснити оцінку стану води без необхідності в складних обчисленнях і складних вхідних даних;
- дозволяє системі точно визначити рівень забруднення води, що є важливим для подальшого управління.

Недоліки цього алгоритму:

- не враховує всіх факторів, що можуть впливати на якість води;
- не може повністю охопити всі можливі забруднювачі та біохімічні процеси в екосистемі.

Отже, проаналізувавши алгоритми роботи систем дослідження екологічного стану водного середовища був зроблений висновок, що оптимізаційні моделі найбільш ефективні для забезпечення оптимальних стратегій. Імітаційні моделі ідеальні для прогнозування. Модель індикаторних показників є ефективною для забезпечення життя водним організмам. Детерміновані моделі забезпечують швидке дослідження і оцінку [1].

3 РОЗРОБКА АПАРАТНОЇ ЧАСТИНИ ПРОЕКТУ

У цьому розділі описано обрані компоненти для системи дослідження водного середовища їх технічні характеристики, розроблено структурну та функціональну схеми проекту.

3.1 Розробка структурної та функціональної схеми

3.1.1 Розробка структурної схеми

Для розробки системи дослідження водного середовища була створена структурна схема, яка наведена на рисунку 3.1. На даній схемі умовно зображені основні модулі.



Рисунок 3.1 – Структурна схема системи дослідження водного середовища

Зчитування параметрів води здійснюється за допомогою різних датчиків, підключених до Arduino Uno. Для вимірювання рН використовується датчик рН, який дозволяє контролювати кислотність або лужність води.

Для вимірювання температури використовується датчик DS18B20, який забезпечує точні вимірювання температури води.

Датчик провідності Tds дозволяє визначити рівень солоності води, що є важливим для морських акваріумів. Датчик рівня води, ультразвуковий датчик HC SR04 забезпечує контроль рівня води в резервуарі, що дозволяє своєчасно поповнювати воду або запобігати переповненню [11].

Після зчитування даних з датчиків, інформація передається до органу управління Arduino Uno. Ця мікроконтролерна платформа забезпечує можливості програмування та контролю за допомогою мікроконтролера ATmega328, який виконує програмний код. Arduino Uno є основою взаємодії елементів схеми для дослідження водного середовища.

Після обробки інформації Arduino Uno, дані відображаються на дисплеї Дисплей LCD 1602 з модулем I2C/ІС, що дозволяє користувачу бачити актуальні параметри водного середовища в режимі реального часу. Це дозволяє своєчасно реагувати на зміни у водному середовищі та забезпечувати оптимальні умови для водних мешканців.

Використання Arduino Uno для дослідження водного середовища забезпечує точний контроль параметрів води, що сприяє підтриманню здорового стану водних мешканців. Система є компактною та легкою у використанні, а також дозволяє автоматизувати процеси контролю та збору даних.

3.1.2 Розробка функціональної схеми

Для розробки системи дослідження водного середовища була створена функціональна схема, яка наведена на рисунку 3.2. На даній схемі зображено підключення компонентів до Arduino Uno.

Підключаємо пін VCC та GND датчика температури DS18B20 до пінів 5V та GND на мікроконтролері Arduino UNO, вони відповідають за живлення датчика від мікроконтролера, який, у свою чергу, живиться від USB-порту комп'ютера.

Пін DATA датчика підключаємо до цифрового пину D2 на

мікроконтролері. Для коректної роботи додаємо підтягувач (резистор 4.7 кОм) між піном DATA і VCC.

Далі, піни VCC та GND ультразвукового датчика HC-SR04 підключаємо до пінів 5V та GND відповідно. Пін TRIG підключаємо до цифрового піну D9, а пін ECHO – до цифрового піну D10, вони відповідають за обмін даними між датчиком HC-SR04 та мікроконтролером.

Пін VCC адаптера I2C, що використовується для підключення РК-дисплея LCD1602, підключаємо до піну 5V на мікроконтролері, а GND – до GND. Для передачі даних пін SDA адаптера з'єднуємо з аналоговим піном A4, а SCL – з аналоговим піном A5.

Живлення датчика рН здійснюється через підключення піну VCC до піну 5V на Arduino UNO, а GND – до GND. Вихідний пін датчика підключаємо до аналогового піну A1, який забезпечує передачу даних до мікроконтролера.

Для датчика TDS підключаємо пін VCC до піну 5V, а GND – до GND на Arduino UNO. Вихідний пін датчика з'єднуємо з аналоговим піном A0, забезпечуючи передачу даних до мікроконтролера.

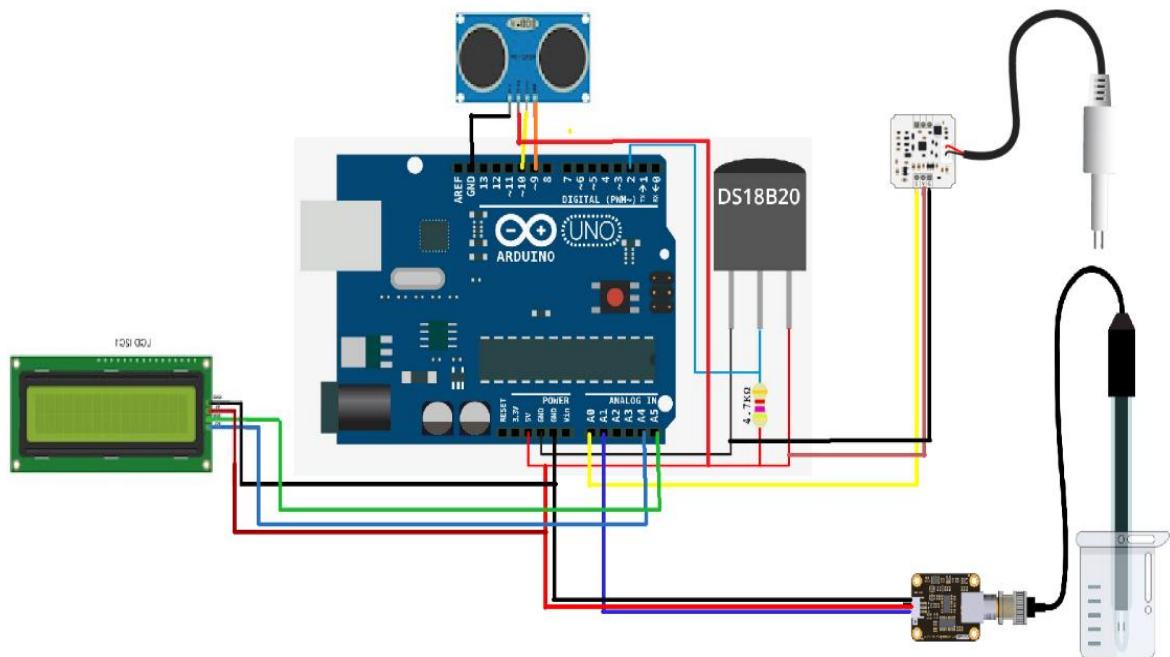


Рисунок 3.2 – Функціональна схема проекту

3.2 Складові мікроконтролерної системи для дослідження середовища

3.2.1 Центральний мікроконтролер Arduino Uno

Для системи що досліджується у якості керуючої складової обираємо Arduino Uno (рис. 3.3). Це платформа з відкритим кодом, побудована на мікроконтролері ATmega328P.

Програмування здійснюється за допомогою C/C++, із деякими спрощеннями, запропонованими Arduino IDE.

Мікроконтролер має свої переваги та обмеження. Серед переваг можна виділити його простоту, його доступність, платформа підтримує широкий спектр застосувань і сумісна з багатьма модулями та сенсорами [13].

Особливості наведені нижче:

- мікроконтролер (МК): ATmega328P;
- робоча напруга: 5В;
- напруга живлення гранична: 6-20В;
- цифрові входи та виходи: 14;
- аналогових входів: 6;
- максимальний струм для одного піну вводу-виводу: 40мА;
- сила струму при 3.3В виходу: до 50мА.



Рисунок 3.3 – Центральний мікроконтролер Arduino Uno

3.2.2 Датчики відстані HC-SR04, температури DS18B20, рН, TDS

Ультразвуковий датчик відстані HC-SR04 (рис. 3.4) є популярним і доступним сенсором для вимірювання відстаней, який активно використовується в електронних проектах, зокрема в робототехніці та системах вимірювання відстаней. Цей датчик дозволяє точно визначати відстань між ним і об'єктами, застосовуючи ультразвукові хвилі.

HC-SR04 має свої переваги та недоліки. Серед переваг можна відзначити, що датчик є доступним і широко використовуваним, забезпечує достатню точність для багатьох задач. Крім того, його легко підключити та налаштувати, особливо в поєднанні з платформами розробки, такими як Arduino [7].

Основні характеристики ультразвуковий датчик відстані HC-SR04:

- робоча напруга: 3.8-5.5В;
- струм: 8мА;
- частота: 40кГц;
- максимальна відстань для дистанції: 1500мм;
- мінімальна відстань для дистанції: 0см.



Рисунок 3.4 – Ультразвуковий датчик відстані HC-SR

Цифровий датчик температури DS18B20 (рис. 3.5) є популярним сенсором, який застосовується в багатьох електронних проектах для точного вимірювання температури. Він високо цінується за свою простоту, надійність і здатність працювати в складних умовах. DS18B20 використовує

однопровідну (1-Wire) шину для зв'язку, що дозволяє легко підключати його до мікроконтролерів, таких як Arduino, за допомогою мінімальної кількості проводів.

Цей датчик має ряд переваг та недоліків. Серед переваг можна зазначити, що DS18B20 дуже просто підключати та програмувати, особливо завдяки бібліотекам, доступним для Arduino та інших мікроконтролерів. Датчик також зменшує необхідність у великій кількості проводів і дозволяє підключати кілька датчиків до однієї лінії даних [6].

Основні характеристики ультразвуковий датчик відстані DS18B20:

- діапазон температури: від -55°C до $+125^{\circ}\text{C}$;
- точність вимірювання: $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ в діапазоні від -10°C до $+85^{\circ}\text{C}$;
- робоча напруга: 3.0–5.5В;
- споживання енергії: до 1мА;
- максимальна довжина: до 100м;



Рисунок 3.5 – Цифровий датчик температури DS18B20

Датчик рН (рис. 3.6), або рН-зонд, є пристроєм, призначеним для вимірювання кислотності або лужності розчинів. Вимірювання рН є критично важливим у таких галузях, як очищення води, сільське господарство, акваріумістику, наукові дослідження, харчова промисловість та різноманітні промислові процеси.

Датчик має кілька переваг і обмежень. Серед переваг можна відзначити, що рН-датчик забезпечує точні та повторювані вимірювання, дозволяючи

отримувати дані в реальному часі. Більшість таких зондів зручно використовуються з цифровими вимірювальними приладами [14].

Основні характеристики датчика рН:

- тип датчика: електрохімічний датчик рН;
- діапазон вимірювання: 0–14;
- робоча напруга: 5В;
- калібрування: можливість виконання двоточкового калібрування;
- роз'єм для підключення: BNC;
- споживання струму: не більше 10 мА;
- довжина кабелю: 1м.



Рисунок 3.6 – Датчик рН

Датчик TDS (Total Dissolved Solids) (рис. 3.7) – це пристрій для вимірювання концентрації розчинених твердих речовин у розчині, вираженої в міліграмах на літр (мг/л) або в частинах на мільйон (ppm). Він застосовується в багатьох сферах, таких як контроль якості води, акваріумістика, гідропоніка та різні промислові процеси.

Датчик TDS має кілька переваг та обмежень. Серед переваг можна відзначити швидке і точне вимірювання концентрації розчинених твердих речовин, а також широкий спектр застосувань у промисловості, сільському господарстві та побутових системах. Датчик є простим у використанні та інтеграції з різними системами моніторингу та контролю [7].

Основні характеристики датчика TDS:

- тип датчика: електропровідний сенсор для вимірювання рівня TDS;
- діапазон вимірювання TDS: 0–1000ppm;
- робоча напруга: 3.3–5.5В;
- інтерфейс: аналоговий;
- роз'єм датчика: ХН2.54-2Р;
- довжина кабелю: 1м.



Рисунок 3.7 – Датчик TDS

3.2.3 Дисплей LCD 1602 з модулем I2C/IIC

LCD 1602 з модулем I2C/IIC (рис. 3.8) є дуже популярним дисплеєм у світі електроніки, особливо цінним за його здатність чітко та зрозуміло відображати інформацію при мінімальному кабелюванні завдяки інтерфейсу I2C (рис. 3.9) .

У LCD 1602 з модулем I2C/IIC є кілька переваг і обмежень. Серед переваг можна відзначити простоту підключення, значне зменшення кількості проводів завдяки інтерфейсу I2C. Крім того, доступна велика кількість бібліотек для різних платформ, що спрощує програмування[4].

Основні характеристики дисплею LCD 1602 с модулем I2C/IIC:

- тип дисплея: текстовий LCD-дисплей;
- роздільна здатність: 16 символів у 2 рядках (16x2);
- інтерфейс: I2C;

- напруга живлення: 5В;
- наявність підсвічування: присутнє;
- розмір видимої області: 64.5мм x 16мм.



Рисунок 3.8 – Дисплей LCD 1602

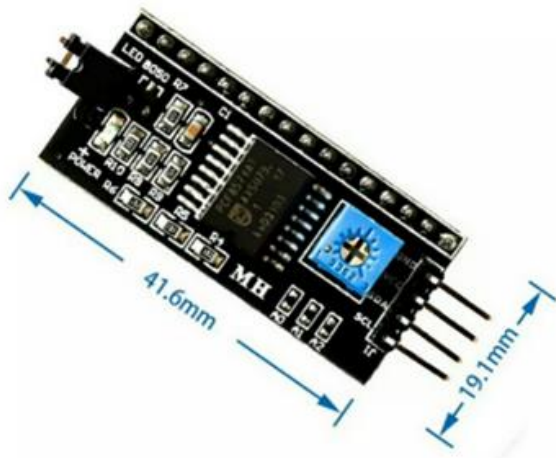


Рисунок 3.9 – Модуль I2C/IIC

3.3 Канали зв'язку

Для системи дослідження водного середовища канали зв'язку є критичними компонентами, оскільки вони забезпечують передачу даних від сенсорів до контролера та, за необхідності, з контролера до зовнішніх пристроїв або серверів. Вибір каналу зв'язку визначається кількома

факторами, такими як обсяг даних, стабільність передачі, відстань між пристроями та умови експлуатації. Основні канали зв'язку для такої системи включають.

Дротове з'єднання – фізичні з'єднання через кабелі або дроти. Вони гарантують високу стабільність і надійність передачі даних, однак обмежені відстанню між пристроями. Такі з'єднання є підходящими для систем, де передача даних відбувається на невеликі відстані і необхідна висока точність.

Бездротові з'єднання – використовують радіохвилі для передачі даних без необхідності прокладання фізичних кабелів. Бездротові канали є важливими для більш складних і мобільних систем, де потрібно передавати дані на великі відстані або у важкодоступних місцях. Вони забезпечують більшу гнучкість і мобільність.

Канали збереження даних – наприклад, використання SD-карт для збереження інформації з сенсорів. Це особливо корисно для автономних систем, де неможливо передавати дані в реальному часі, або коли потрібно зберігати дані для подальшого аналізу. SD-карти можуть бути використані для локального зберігання даних до моменту, коли з'явиться можливість їх передати або проаналізувати.

Глобальна система позиціонування (GPS) – модуль GPS дозволяє отримувати координати місцезнаходження пристрою, що є корисним для моніторингу навколишнього середовища в реальному часі. Завдяки GPS дані про точне місце розташування можуть бути важливими для аналізу географічних факторів, таких як стан водного середовища [5].

У рамках нашого проекту використовується дротовий канал зв'язку через дроти типу “Female to Male” (рис. 3.10). Це забезпечує стабільну і надійну передачу даних між пристроями на обмежених відстанях, що підходить для контрольованих умов, де не потрібна мобільність або значні відстані між пристроями. Дротове з'єднання допомагає знизити ймовірність перешкод та забезпечує стабільність сигналу.



Рисунок 3.10 – Дротовий канал зв'язку “Female to Male”

3.4 Протоколи зв'язку

Для системи дослідження водного середовища на платформі Arduino Uno використовуються різні протоколи зв'язку, що дозволяють збирати, передавати та обробляти дані з датчиків. Оскільки Arduino Uno має обмежену кількість портів і ресурсів, вибір відповідних протоколів залежить від типів підключених сенсорів і вимог до швидкості передачі інформації. Ось деякі з основних протоколів, які можуть бути застосовані в такій системі.

Аналоговий інтерфейс (Analog). Це один з найпростіших методів передачі даних від датчика до Arduino, де датчики генерують змінну напругу в певному діапазоні, яку Arduino може зчитувати і конвертувати в цифрові значення. Прикладом є рН-метри або TDS-метри, які передають інформацію через зміну напруги, що відповідає рівню кислотності чи мінералізації.

Послідовний протокол (UART). UART (Universal Asynchronous Receiver-Transmitter) є асинхронний послідовний протокол для обміну даними між Arduino та іншими модулями. Для цього необхідні два контакти: TX для передачі і RX для прийому даних. Він використовується для підключення пристроїв з UART-інтерфейсом, таких як цифрові рН-метри, TDS-метри або бездротові Bluetooth-модулі [2].

I2C (Inter-Integrated Circuit). Це двопровідний протокол (SCL для тактових сигналів і SDA для передачі даних), який дозволяє підключати кілька

пристроїв до однієї шини. Кожен пристрій має унікальну адресу для ідентифікації. Прикладом є датчики температури та вологості, а також деякі спеціалізовані датчики для моніторингу водного середовища, які підтримують I2C.

SPI (Serial Peripheral Interface). Це високошвидкісний протокол зв'язку, що використовує чотири лінії: MOSI (Master Out Slave In), MISO (Master In Slave Out), SCK (Serial Clock) і SS (Slave Select). На відміну від I2C, SPI дозволяє передавати дані набагато швидше між Arduino і периферійними пристроями. Наприклад, його використовують для підключення швидких пристроїв, таких як дисплеї чи SD-карти для збереження великих обсягів даних [9].

1-Wire. Це протокол, що дозволяє підключати пристрої через один контакт, використовуючи його для передачі як даних, так і живлення датчика. Це зручно для цифрових термометрів, таких як DS18B20, які часто застосовуються для вимірювання температури в середовищах, що потребують моніторингу.

4 РОЗРОБКА ПРОГРАМНОЇ ЧАСТИНИ ПРОЕКТУ

У цьому розділі було приведено опис середовища розробки для нашої системи та опис розробленого коду зі скріншотами та лістингами, після чого було тестування працездатності розробленої системи дослідження водного середовища.

4.1 Середовище розробки проекту

Integrated Development Environment (IDE) – це програмне забезпечення, яке об'єднує різноманітні інструменти, необхідні для розробки програм, в одному середовищі (рис. 4.1). IDE надає набір засобів, що дозволяють програмістам створювати, редагувати, налагоджувати та компілювати програми більш ефективно. Зазвичай IDE включає редактор вихідного коду, компілятор, відлагоджувач і середовище для управління проектами [4].

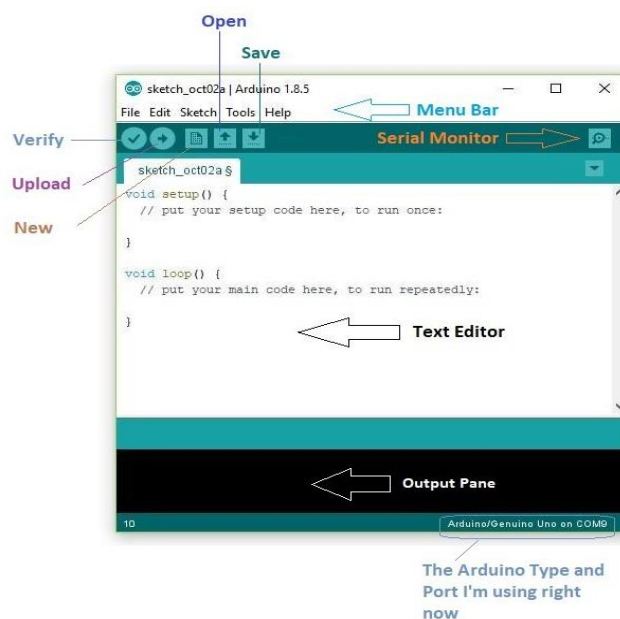


Рисунок 4.1 – Інтерфейс Arduino IDE

Arduino IDE – це відкрите програмне забезпечення, розроблене

спеціально для створення проектів на платформі Arduino. Інтерфейс Arduino IDE простий і зручний для користувача. Він включає редактор коду, де можна писати програми для Arduino, використовуючи синтаксис на основі мов програмування C/C++. IDE має такі функції, як підсвічування синтаксису, автоматичне вирівнювання відступів, автодоповнення коду та перевірка синтаксису, що значно полегшують процес написання програм [8].

Для підключення комп'ютера до Arduino Uno потрібен лише кабель з роз'ємами USB-A та USB-B. Для початку роботи зі середовищем розробки Arduino IDE необхідно запустити програму та перевірити правильність налаштувань. У меню Файл/Налаштування слід переконатися, що всі параметри відповідають стандартним налаштуванням. Далі потрібно перейти до Інструменти/Плата/Arduino AVR Boards та обрати "Arduino Uno" зі списку доступних плат (рис. 4.2).

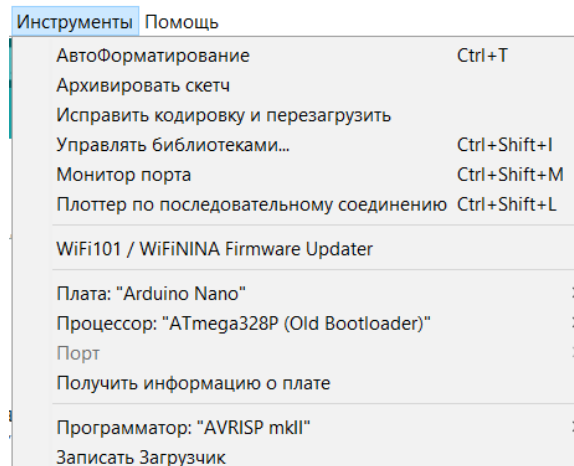


Рисунок 4.2 – Меню «Інструменти» в Arduino IDE

4.2 Програмна розробка

4.2.1 Налаштування системи проекту

До початку написання коду та роботи з проектом необхідно визначити основні бібліотеки для роботи з мікроконтролером Arduino Uno: OneWire,

DallasTemperature, NewPing, LiquidCrystal_I2C.

Ці бібліотеки дозволяють працювати з датчиками температури DS18B20, рН, TDS та ультразвуковим датчиком HC-SR04. У нашому коді необхідно створити об'єкти для роботи з кожним датчиком. Для датчика температури DS18B20 потрібно ініціалізувати об'єкт бібліотеки DallasTemperature, а для ультразвукового датчика встановити об'єкт NewPing. Дані бібліотеки можна встановити автоматично через середовище Arduino IDE за допомогою менеджера бібліотек. Для цього потрібно відкрити пункт меню Інструменти/Керувати бібліотеками, у вікні менеджера бібліотек ввести назву відповідної бібліотеки (наприклад, OneWire) та обрати стабільну версію для встановлення [2]. Якщо необхідна бібліотека вже є на комп'ютері у форматі .ZIP архіву, її можна додати вручну. Для цього потрібно перейти до пункту меню Скетч/Підключити бібліотеку/Додати .ZIP бібліотеку та вказати шлях до архіву на локальному пристрої. Після встановлення необхідних бібліотек для коректної роботи датчиків їх слід підключити у основному файлі коду. Це виконується за допомогою директиви препроцесора #include. Також необхідно встановити основні параметри системи дослідження екологічного стану водного середовища на лістингу 4.1.

Налаштування основних параметрів:

- Wire.h – підключення бібліотеки для роботи з I2C;
- LiquidCrystal_I2C.h – підключення бібліотеки для роботи з I2C;
- OneWire – підключення бібліотеки для роботи з датчиком DS18B20;
- DallasTemperature.h – підключення бібліотеки для роботи з датчиком DS18B20;
- TDS_PIN A0 – визначає пін, куди підключений TDS датчик;
- PH_PIN A1 – визначає пін, куди підключений рН датчик;
- TRIG_PIN 9 – визначає пін, куди підключений сигнал TRIG ультразвукового датчика;
- define ECHO_PIN 10 – визначає пін, куди підключений сигнал ECHO ультразвукового датчика;

- TEMP_PIN 2 – визначає пін, куди підключений сигнал температурного датчика;
- LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 16, 2) – підключення функції для роботи з дисплеєм;
- OneWire oneWire(TEMP_PIN) – підключення функції для роботи з датчиком DS18B20;
- DallasTemperature sensors(&oneWire) – підключення функції для роботи з датчиком DS18B20.

Лістинг 4.1 – Ініціалізація змінних та підключення бібліотеки

```
#include <Wire.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
#include <OneWire.h>
#include <DallasTemperature.h>
#define TDS_PIN A0
#define PH_PIN A1
#define TRIG_PIN 9
#define ECHO_PIN 10
#define TEMP_PIN 2
LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 16, 2);
OneWire oneWire(TEMP_PIN);
DallasTemperature sensors(&oneWire);
```

4.2.2 Налаштування датчика температури DS18B20

Приклад налаштування датчика температури DS18B20 приведено на рисунку 4.3.

```
sensors.requestTemperatures();
float temperature = sensors.getTempCByIndex(0);
```

Рисунок 4.3 – Функція налаштування датчика температури DS18B20

Після підключени бібліотеки (OneWire) та (OneWire), змінної (OneWire) і функції (DallasTemperature), було визначено пін підключення датчика температури (TEMP_PIN).

Даний код описує роботу температурного датчика DS18B20 та алгоритм його використання.

У функції loop() здійснюється запит даних з датчика та виведення результатів на LCD-дисплей. Основними частинами функції є:

- sensors.requestTemperatures() – запит поточного значення температури у датчика DS18B20;
- float temperature = sensors.getTempCByIndex(0) – отримання виміряного значення температури в градусах Цельсія. Метод getTempCByIndex(0) повертає температуру з датчика, підключеного до першого доступного індексу (0 – єдиний датчик у системі).

4.2.3 Налаштування датчика відстані HC-SR04

Приклад налаштування ультразвукового датчику відстані HC-SR04 приведено в лістингу 4.2.

Лістинг 4.2 – Функція налаштування датчику відстані HC-SR04

```
void setup() {
    pinMode(trigPin, OUTPUT);
    pinMode(echoPin, INPUT);
}

void loop() {
    digitalWrite(TRIG_PIN, LOW);
    delayMicroseconds(2);
    digitalWrite(TRIG_PIN, HIGH);
    delayMicroseconds(10);
    digitalWrite(TRIG_PIN, LOW);
```

```
long duration = pulseIn(ECHO_PIN, HIGH);
float distance = duration * 0.034 / 2;
lcd.clear();
lcd.setCursor(0, 0);
if (distance >= 9 && distance < 10) {
    lcd.print("Volume: 0.1 ml");
} else if (distance >= 8 && distance < 9) {
    lcd.print("Volume: 0.2 ml");
} else if (distance >= 7 && distance < 8) {
    lcd.print("Volume: 0.3 ml");
} else if (distance >= 6 && distance < 7) {
    lcd.print("Volume: 0.4 ml");
} else if (distance >= 5 && distance < 6) {
    lcd.print("Volume: 0.5 ml");
} else if (distance >= 4 && distance < 5) {
    lcd.print("Volume: 0.6 ml");
} else if (distance >= 3 && distance < 4) {
    lcd.print("Volume: 0.7 ml");
} else if (distance >= 2 && distance < 3) {
    lcd.print("Volume: 0.8 ml");
} else if (distance >= 1 && distance < 2) {
    lcd.print("Volume: 0.9 ml");
} else if (distance >= 0 && distance < 1) {
    lcd.print("Volume: 1 L");
} else if (distance > 11 || distance < 0) {
    lcd.print("V: ");
} else {
    lcd.print("Unknown Range");
}
delay(1000);
}
```

Даний код виконую налаштування ультразвукового датчику та його взаємодії з іншими мікроконтролерами.

У функції (setup()) було оголошено режим піна виходу тригера функцією

(pinMode(trigPin, OUTPUT)), де trigPin – це пін підключення тригера до Arduino Uno.

Далі було оголошено режим піна входу ехо функцією (pinMode(echoPin, INPUT)), де echoPin – це пін підключення ехо до Arduino Nano.

У функції loop() здійснюється вимірювання відстані та виведення результатів. Основні кроки функції наступні:

- digitalWrite(TRIG_PIN, LOW) – записує низький рівень (LOW) на пін TRIG_PIN. Це призначено для забезпечення початкового стану перед вимірюванням;

- digitalWrite(TRIG_PIN, LOW) – встановлює пін TRIG_PIN в низький стан (LOW), щоб почати процес вимірювання відстані;

- delayMicroseconds(2) – коротка затримка на 2 мікросекунди, щоб підготувати систему до відправлення сигналу;

- digitalWrite(TRIG_PIN, HIGH) – встановлює пін TRIG_PIN в високий стан (HIGH), що активує ультразвуковий датчик для відправлення звукового сигналу;

- delayMicroseconds(10) – затримка на 10 мікросекунд, що визначає тривалість імпульсу, який датчик відправляє;

- digitalWrite(TRIG_PIN, LOW) – після відправлення імпульсу, пін TRIG_PIN повертається в низький стан;

- long duration = pulseIn(ECHO_PIN, HIGH) – вимірює час, протягом якого пін ECHO_PIN був в стані HIGH, що відображає час, необхідний для проходження звукового сигналу від датчика до об'єкта і назад;

- float distance = duration * 0.034 / 2 – розраховує відстань до об'єкта. Час duration множиться на швидкість звуку (0.034 см/мксек) і ділимо на 2, оскільки сигнал проходить туди і назад.

Далі функція відображає на дисплеї об'єм залежно від виміряної відстані:

- if (distance >= 9 && distance < 10) – якщо відстань знаходиться в діапазоні від 9 до 10 см, на дисплеї виводиться "Volume: 0.1 ml". Для інших

діапазонів відстаней виводяться відповідні значення об'єму, досягнуті за допомогою подібних умов;

- `else if (distance > 11 || distance < 0)` – якщо відстань від 11 або менше 0, на дисплеї виводиться " Unknown Range " і відстань, яку передає датчик відстань.

- `delay(1000)` – функція повторює вимірювання щосекунди завдяки цієї функції.

4.2.4 Налаштування датчика рН

Приклад налаштування датчика рН наведено на рисунку 4.4. Даний текст описує роботу датчика рН та алгоритм зчитування аналогового сигналу з відповідного піну мікроконтролера, подальше перетворення цього сигналу у значення рН та виведення на екран.

У функції `loop()` здійснюється зчитування значення з датчика та виведення результатів на LCD-дисплей.

```
void loop() {
  int pHValue = analogRead(PH_PIN);
  float voltage = pHValue * (5.0 / 1023.0);
  float pH = 3.5 * voltage;
```

Рисунок 4.4 – Функція налаштування датчика температури DS18B20

Основними частинами функції `loop()` є:

- `int pHValue = analogRead(PH_PIN)` – зчитування значення з датчика рН, підключеного до піну A1 (`PH_PIN`). Ця функція повертає значення в діапазоні від 0 до 1023, що відповідає вимірюваному значенню напруги;

- `float voltage = pHValue * (5.0 / 1023.0)` – перетворення зчитаного значення в аналогове значення напруги в діапазоні від 0 до 5 В. Це здійснюється за допомогою формули, яка враховує 10-бітне значення аналогового сигналу;

- `float pH = 3.5 * voltage` – перерахунок напруги в значення рН. Формула

для цього є приблизною та залежить від характеристик використаного датчика. В даному випадку рН обчислюється як 3.5 помножене на значення напруги.

4.2.5 Налаштування датчика TDS

Приклад налаштування датчика Tds наведено на рисунку 4.5.

```
int tdsValue = analogRead(TDS_PIN);
```

Рисунок 4.5 – Функція налаштування датчика Tds

Цей код описує роботу датчика TDS та алгоритм його використання.

У функції loop() здійснюється зчитування значення з датчика та виведення результатів на LCD-дисплей. Основними частинами функції є:

- int tdsValue = analogRead(TDS_PIN) – зчитування значення з датчика TDS, підключеного до піну A0 (TDS_PIN);
- lcd.setCursor(0, 0) – встановлення курсора на перший рядок LCD-дисплея, щоб почати виведення тексту.

4.2.6 Налаштування дисплея LCD 1602 з модулем I2C/ПС

Приклад дисплея LCD 1602 з модулем I2C/ПС наведено в лістингу 4.3.

Лістинг 4.3 – Функція дисплея LCD 1602 з модулем I2C/ПС

```
void setup() {
    lcd.init();
    lcd.backlight();
}

void loop() {
    lcd.setCursor(0, 0);
```

```

    lcd.print("TDS: ");
    delay(2000);
    lcd.clear();
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.print("pH: ");
    delay(2000);
    lcd.clear();
}

```

Цей текст описує роботу з дисплеєм LCD 1602 через модуль I2C та алгоритм відображення інформації. У функції `loop()` здійснюється виведення значень сенсорних даних у два рядки дисплея.

Основними частинами функції `loop()` є:

- `lcd.setCursor(0, 0)` – встановлення курсора на початок першого рядка дисплея для виведення тексту, що пояснює дані, які будуть відображені (в цьому випадку значення TDS);
- `lcd.print("TDS: ")` – виведення тексту "TDS: " на дисплей для позначення значення, яке стосується концентрації розчинених твердих часток;
- `lcd.setCursor(0, 1)` – встановлення курсора на початок другого рядка дисплея для виведення інформації про значення рівня рН;
- `lcd.print("pH: ")` – виведення тексту "pH: " на дисплей для позначення значення рівня кислотності;
- `delay(2000)` – затримка на 2 секунди перед очищенням дисплея для забезпечення часу на читання інформації;
- `lcd.clear()` – очищення дисплея перед виведенням нових даних, щоб уникнути накладання тексту.

4.3 Інтеграція методу поєднання системного аналізу з математичним

Приклад інтеграції методу поєднання системного аналізу з математичним для обчислення параметрів рН та TDS наведено в лістингу 4.4.

Лістинг 4.4 – Функція інтеграції методу поєднання системного аналізу з математичним

```

void calculateCorrections(int tdsMeasured, float pHMeasured,
float temperature, float& correctedTDS, float& correctedPH) {
    correctedTDS = tdsMeasured * (1 - alpha * (temperature -
20)) + delta * (pHMeasured - pH_referent);
    correctedPH = pHMeasured - beta * (temperature - 20) - gamma
* (tdsMeasured - TDS_referent);
}
float correctedTDS;
float correctedPH;
calculateCorrections(tdsMeasured, pHMeasured, temperature,
correctedTDS, correctedPH);

```

На етапі обробки даних функція `calculateCorrections` використовується для розрахунку скоригованих значень TDS і pH. Вхідні параметри, такі як значення TDS (`tdsMeasured`), pH (`pHMeasured`) та температура (`temperature`), дозволяють врахувати вплив температури і відхилення від еталонних значень.

4.4 Тестування проекту

Після підключення усіх необхідних компонентів до Arduino Uno та завантаження коду у головний мікроконтролер, було встановлено систему дослідження екологічного стану водного середовища на ємність з водою. На рисунку 4.6 зображена система дослідження екологічного стану водного середовища.

Першим тестом системи було тестування роботи датчика температури DS18B20 у воді, у якій термометр показує температуру 15.9 градусів. Після зчитування показників температури води датчиком DS18B20, на дисплеї було виведено результат 15.9 градусів. На рисунку 4.7 зображено результат тестування роботи датчика температури DS18B20.



Рисунок 4.6 – Система дослідження екологічного стану водного середовища



Рисунок 4.7 – Результат тестування роботи датчика температури DS18B20

Другим тестом системи було тестування роботи датчика рН в демінералізованій воді, у якій рН дорівнює 7. Після зчитування показників кислотно-лужного балансу рідини води датчиком рН, на дисплеї було виведено результат рН 7.0. На рисунку 4.8 зображено результат тестування роботи датчика рН.



Рисунок 4.8 – Результат тестування роботи датчика рН

Третім тестом системи було тестування роботи датчика TDS в демінералізованій воді, у якій TDS має дорівнювати близько 0-2 ppm . Після зчитування показників балансу солі у рідині води датчиком на дисплеї , було виведено результат 1 ppm. На рисунку 4.9 зображено результат тестування роботи датчика TDS.



Рисунок 4.9 – Результат тестування роботи датчика TDS

Четвертим тестом системи було тестування роботи датчика відстані HC-SR04. Після зчитування показника рівня рідини води у ємкості датчиком відстані було виведено інформацію про рівень води на дисплей системи. На рисунку 4.10 зображено тестування роботи датчика відстані HC-SR04.



Рисунок 4.10 – Тестування роботи датчика відстані HC-SR04

Після тестування роботи датчиків було проведено аналіз стану води з бурової свердловини. Після отримання результатів показників параметрів

системи до інтеграції методу поєднання системного аналізу з математичним методом (рис. 4.11) та після інтеграції цього методу (рис 4.12) було отриману 0.2 похибку рН та 26 похибку TDS при температурі 14.3 градусів відносно методу поєднання системного аналізу з математичним методом.

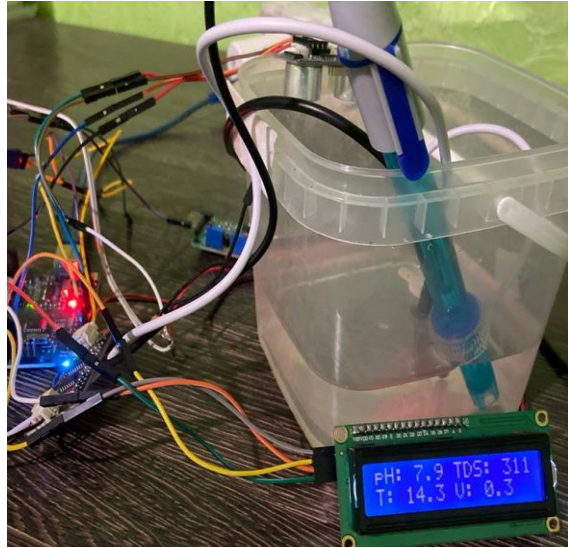


Рисунок 4.11 – Результати параметрів системи до використання методу поєднання системного аналізу з математичним

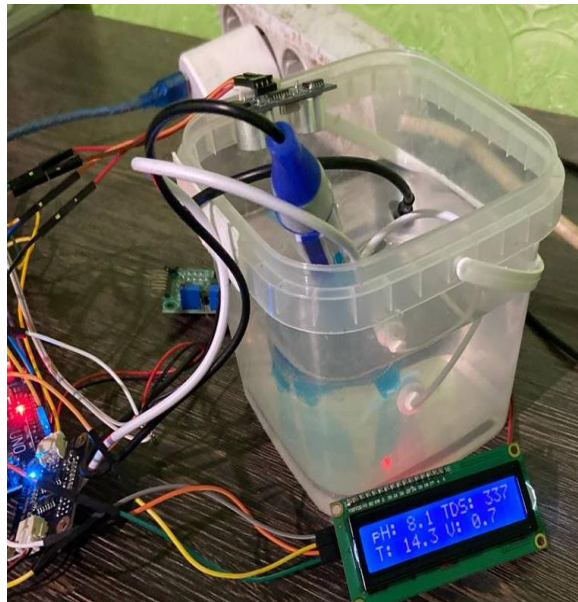


Рисунок 4.12 – Результати параметрів системи після використання методу поєднання системного аналізу з математичним

ВИСНОВКИ

У ході написання кваліфікаційної роботи було проведено детальне дослідження програмно-апаратних систем різних типів, що використовуються для дослідження екологічного стану водного середовища.

Після аналізу було прийнято рішення що до використання системи локального апаратно-програмного комплексу.

При виконанні роботи було розглянуто принципи роботи відомих апаратно-програмних систем моніторингу водного середовища, таких як Seneeye Home Aquarium Monitor та Neptune Systems APEX. Було встановлено, що система Seneeye Home Aquarium Monitor демонструє високу здатність до контролю якості води з використанням різноманітних сенсорів, а система Neptune Systems APEX, в свою чергу, орієнтована на комплексне управління та моніторинг водного середовища. Недоліками цих систем є проблема обслуговування датчиків, та залежність від інтернет-з'єднання та обмеження параметрів, що вимірюються.

Аналіз недоліків дав можливість обрати потрібні складові, що в подальшому дозволили розробити власну програмно-апаратну систему для дослідження екологічного стану водного середовища.

У системі, що була розроблена, з'явилася можливість надавати дані без доступу до інтернету, збільшено параметрів, що вимірюються, з'явилася можливість обслуговування датчиків. Система має швидшу та стабільнішу роботу завдяки обраному дротовому каналу зв'язку.

Розроблено функціональну та структурну схему системи дослідження екологічного стану водного середовища. Для вирішення завдання керування обрано центральний мікроконтролер Arduino Uno, для отримання показників з об'єкта та відображення інформації обрано: датчик температури DS18B20, дисплей LCD 1602 з модулем I2C/IIC, датчик рН та датчик TDS; обрано дротові канали зв'язку та UART, I2C, SPI, USB протоколи.

У програмній частині проекту реалізовано взаємодію між апаратною частиною системи та водними середовищем. При виконанні програмної частини проекту було обрано Arduino IDE середовище розробки та мову програмування Arduino C.

Наукова новизна роботи полягає в тому, що для дослідження екологічного стану водного середовища запропоновано новий підхід, який поєднує системний аналіз і математичний метод з детермінованою моделлю, що дало можливість зменшити відносну похибку обчислень отриманих параметрів системи, тим самим покращило точність аналізу параметрів води.

На основі завдання на розробку програмно-апаратної системи дослідження екологічного стану водного середовища, розроблено у вигляді повного функціоналу система дослідження екологічного стану водного середовища, протестована апаратна та програмна частина підтвердили працездатність її складових.

У подальшому систему можна удосконалювати за рахунок розширення списку нових параметрів для дослідження, таких як рівень хлору або нітратів, а також реалізувати можливість інтеграції з іншими системами моніторингу для створення більш комплексного екологічного моніторингу.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Безсонний В. Л. Методологічні підходи до дослідження екологічного стану природних ресурсів. 2023. – С. 28–40. – URL: <http://www.repository.hneu.edu.ua/jspui/bitstream/123456789/30789/1/2023Безсонний%20В%20Л.pdf> (дата звернення: 09.01.2025).
2. Іванченко А. П., Сидоренко М. В. Екологічний моніторинг водного середовища: теоретико-методичні засади : монографія. Київ : Екологічна перспектива, 2020. 320 с.
3. Подворний, В. Т. (2024). Програмно-апаратна система дослідження екологічного стану водного середовища. Тези доповідей міжнародної науково-практичної конференції "Сучасні підходи в науці та освіті", 20 грудня 2024 року. URL: <https://archive.liga.science/index.php/conference-proceedings/issue/view/ukr-20.12.2024/111> (дата звернення: 25 грудня 2024 року).
4. Гавриленко О. В., Шевченко Ю. М. Використання Arduino Uno для дослідження стану водного середовища : навч. посіб. Львів : ЛНУ, 2019. 150 с.
5. Ткачук В. І., Мельник А. М. Екологічні сенсори та системи моніторингу : навч.-метод. посіб. Харків : Гранд-Сервіс, 2018. 180 с.
6. Подворний, В. Т. (2024). Методи дослідження екологічного стану водного середовища за допомогою Arduino Uno та датчиків. URL: <https://openarchive.nure.ua/server/api/core/bitstreams/fab7e78b-3af0-4784-af71-f59c90e9fa37/content> (дата звернення: 09 січня 2025 року).
7. Подворний, В. Т. (2023). Автоматизована система утилізації відходів. URL: <https://openarchive.nure.ua/server/api/core/bitstreams/cdc7aaf3-0d46-4d8d-ba39-213adbcc99c5/content> (дата звернення: 09 січня 2025 року).
8. Кравченко І. П., Павленко С. О. Arduino в екологічних дослідженнях: конспект лекцій. Одеса : Освіта, 2020. 110 с.

9. Савченко Р. В., Лисенко А. Г. Контролінг водних ресурсів за допомогою Arduino Uno : навч. посіб. Чернівці : ЧНУ, 2018. 140 с.
10. Савченко Р. В., Лисенко А. Г. Контролінг водних ресурсів за допомогою Arduino Uno : навч. посіб. Вид. 2-ге, переробл. та доповн. Вінниця: ЕкоСвіт, 2021. 210 с.
11. Іваненко П. М. Апаратно-програмні засоби моніторингу якості водних ресурсів : навч. посіб. Київ : Наукова думка, 2020. 256 с.
12. Петров О. В., Сидоренко К. Л. Методи аналізу екологічного стану водного середовища : монографія. Харків : Видавництво ХНУ, 2018. 320 с.
13. Синиця Л. В. Сучасні технології екологічного моніторингу : конспект лекцій. Львів : Ліга-Прес, 2019. 140 с.
14. Коваленко А. О. Системи збору та аналізу даних у екологічному моніторингу : навч.-метод. посіб. Запоріжжя : ЗНУ, 2021. 112 с.