

Хмельницький національний університет  
Факультет інформаційних технологій  
Кафедра комп'ютерної інженерії та інформаційних систем

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА МАГІСТРА

Галузь знань 12 – Інформаційні технології

Спеціальність 123 – Комп'ютерна інженерія

на тему «Метод та кіберфізична система моніторингу водних ресурсів»

КВРКІ.302169.23.01.62 ПЗ

Виконав: студент 2 курсу, група КІ2м-23-2

Керівник доктор філософії, ст. викладач  
Науковий ступінь, вчене звання

До захисту допускаю:  
Зав. кафедри КІС, д.ф., доц.  
Ольга ПАВЛОВА  
19 05 2025 р.

  
Підпис Андрій БАЛАН  
Ініціали, прізвище

  
Підпис Юрій ВОЙЧУР  
Ініціали, прізвище

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Кафедра КОМП'ЮТЕРНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ

Освітній рівень МАГІСТР

Галузь знань 12 ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

Спеціальність 123 КОМП'ЮТЕРНА ІНЖЕНЕРІЯ

Освітня програма ОСВІТНЬО-НАУКОВА ПРОГРАМА «КОМП'ЮТЕРНА ІНЖЕНЕРІЯ ТА ПРОГРАМУВАННЯ»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедри Ольга ПАВЛОВА



“ 01 ” 11 2024 р.

**ЗАВДАННЯ  
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ МАГІСТРА**

Андрія БАЛАНА

Прізвище, ім'я, по батькові студента

1. Тема проекту (роботи) Метод та кіберфізична система моніторингу водних ресурсів  
Керівник проекту (роботи) Юрій ВОЙЧУР, д.ф., старший викладач

Прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання

Затверджена наказом ректора університету від 08.01.2025 р. № 8

2. Строк подання студентом проекту (роботи) на кафедру 01.05.2025 р.

3. Вихідні дані до проекту (роботи) Завдання на кваліфікаційну роботу

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) \_\_\_\_\_

Аналіз відомих методів та рішень для моніторингу водних ресурсів

Вибір компонентів для кіберфізичної системи моніторингу водних ресурсів

Метод та алгоритм діяльності кіберфізичної системи моніторингу водних ресурсів

Кіберфізична система моніторингу водних ресурсів

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслень) \_\_\_\_\_

6. Консультанти розділів кваліфікаційної роботи магістра

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Нормоконтроль	Сергій ЛИСЕНКО, професор кафедри КІПС		
Антиплагіат	Андрій НІЧЕПОРУК, доцент кафедри КІПС		

7. Дата видачі завдання « 02 » 09 2024 р.

**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

№з/п	Назва етапів (розділів) Кваліфікаційної роботи магістра	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Вибір напрямку дослідження та узгодження тематики кваліфікаційної роботи з керівником	02.09.2024	виконано
2	Ознайомлення з предметною областю; формулювання мети та задач дослідження; визначення об'єкта та предмета дослідження	01.10.2024	виконано
3	Робота над розділом 1 – аналіз відомих моделей, методів за темою; постановка задачі	01.11.2024	виконано
4	Робота над розділом 2 – підбір елементної бази для вирішення поставленої задачі	01.12.2024	виконано
5	Робота над науковою статтею	01.02.2025	виконано
6	Робота над розділом 3 – розробка методів для вирішення поставленої задачі	15.02.2025	виконано
7	Робота над розділом 4 – проектування та розробка ПЗ для вирішення поставленої задачі, експериментальна частина	01.04.2025	виконано
8	Оформлення пояснювальної записки згідно вимог	18.04.2025	виконано
9	Попередній захист кваліфікаційної роботи	25.04.2025	виконано
10	Захист кваліфікаційної роботи на засіданні ЕК	До 20.05.2025	

Студент

  
Підпис

Андрій БАЛАН  
Ініціали, прізвище

Керівник роботи

  
Підпис

Юрій ВОЙЧУР  
Ініціали, прізвище

## РЕФЕРАТ

Тема кваліфікаційної роботи: Метод та кіберфізична система моніторингу водних ресурсів.

Автор роботи: Балан А.Г., студент групи КІ2М-23-2.

Керівник роботи: Войчур Ю.О., доктор філософії, старший викладач кафедри комп'ютерної інженерії та інформаційних систем.

Пояснювальна записка: 103 с., 8 рис., 5 табл., 2 дод., 81 джерел.

**ПЕРЕЛІК КЛЮЧОВИХ СЛІВ:** кіберфізична система, параметри моніторингу водних ресурсів, моніторинг водних ресурсів, датчики та IoT -пристрої для вимірювання рівня води, температури, кислотно-лужного балансу, хімічного складу води, швидкості потоку, наявності домішок у воді.

*Об'єктом дослідження* є процес автоматизації моніторингу водних ресурсів.

*Предметом дослідження* є метод та кіберфізична система моніторингу водних ресурсів.

*Метою кваліфікаційної роботи* є автоматизація процесу моніторингу водних ресурсів, зокрема, моніторингу рівня води, температури води, кислотно-лужного балансу води, хімічного складу води, швидкості потоку води, наявності домішок у воді шляхом створення кіберфізичної системи моніторингу водних ресурсів.

Для розв'язання поставлених задач використовуються основні положення системного аналізу (ієрархічності, декомпозиції та ін.), загальної теорії систем, теорії моделювання процесів, теоретико-множинні підходи, методи концептуального моделювання, евристичні оцінки, принципи побудови баз знань та формування логічного висновку.

*Наукова новизна отриманих результатів:* вдосконалено метод діяльності кіберфізичної системи моніторингу водних ресурсів, що відрізняється від існуючих аналогів кіберфізичною інтеграцією (поєднанням фізичних (сенсори, об'єкти) та кібернетичних (аналітика, керування) компонентів) та забезпечує автономність (здатність функціонувати без постійного втручання людини), масштабованість

(можливість розширення географії моніторингу), безперервність моніторингу (цілодобове спостереження в реальному часі).

*Практична значущість отриманих результатів* полягає у реалізації кіберфізичної системи моніторингу водних ресурсів, яка забезпечує збір та моніторинг параметрів водних ресурсів у реальному часі.

У розділі 1 кваліфікаційної роботи проведений аналіз відомих методів та рішень для моніторингу водних ресурсів. У розділі 2 здійснений вибір компонентів для кіберфізичної системи моніторингу водних ресурсів. У розділі 3 кваліфікаційної роботи розроблені метод та алгоритм діяльності кіберфізичної системи моніторингу водних ресурсів. У розділі 4 спроектовано кіберфізичну систему моніторингу водних ресурсів.

## ЗМІСТ

<b>ВСТУП</b> .....	4
<b>1 АНАЛІЗ ВІДОМИХ МЕТОДІВ ТА РІШЕНЬ ДЛЯ МОНІТОРИНГУ ВОДНИХ РЕСУРСІВ</b> .....	8
1.1 Відомі кіберфізичні системи моніторингу водних ресурсів .....	8
1.2 Параметри моніторингу водних ресурсів .....	18
1.3 Висновки. Постановка задачі.....	23
<b>2 ВИБІР КОМПОНЕНТІВ ДЛЯ КІБЕРФІЗИЧНОЇ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ ВОДНИХ РЕСУРСІВ</b> .....	25
2.1 Нижній рівень кіберфізичної системи моніторингу водних ресурсів .....	25
2.2 Середній рівень кіберфізичної системи моніторингу водних ресурсів.....	48
2.3 Висновки .....	54
<b>3 МЕТОД ТА АЛГОРИТМ ДІЯЛЬНОСТІ КІБЕРФІЗИЧНОЇ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ ВОДНИХ РЕСУРСІВ</b> .....	55
3.1 Метод діяльності кіберфізичної системи моніторингу водних ресурсів .....	55
3.2 Алгоритм діяльності кіберфізичної системи моніторингу водних ресурсів ..	62
3.3 Висновки .....	65
<b>4 КІБЕРФІЗИЧНА СИСТЕМА МОНІТОРИНГУ ВОДНИХ РЕСУРСІВ</b> .....	67
4.1 Кіберфізична система визначення параметрів ґрунту.....	67
4.2 Приклади функціонування кіберфізичної системи моніторингу водних ресурсів.	71
4.3 Висновки .....	74
<b>ВИСНОВКИ</b> .....	75
<b>ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ</b> .....	79
<b>ДОДАТОК А</b> .....	87
<b>ДОДАТОК Б</b> .....	94

## ВСТУП

Актуальність моніторингу водних ресурсів визначається їхнім критичним значенням для життєдіяльності людини, економіки та екосистем. В умовах зростаючого навантаження на водні ресурси, змін клімату, урбанізації та забруднення необхідно забезпечити своєчасне відстеження їх стану для ефективного управління та збереження [1].

Моніторинг водних ресурсів є необхідним для забезпечення водної безпеки, адже контроль якості питної води допомагає запобігти поширенню хвороб, а виявлення забруднень і їхніх джерел дає можливість своєчасно реагувати на екологічні загрози. Він також відіграє важливу роль у збереженні екологічної безпеки та біорізноманіття, оскільки забруднення водних екосистем негативно впливають на рівень кисню у воді та призводять до евтрофікації, що може спричинити загибель водних організмів [2].

Важливим аспектом є вплив водних ресурсів на економіку та аграрний сектор, адже їх використання в промисловості, енергетиці та сільському господарстві потребує контролю за рівнем води у водоймах, щоб забезпечити стабільність іригаційних систем і роботу гідроелектростанцій. З огляду на зміни клімату моніторинг допомагає виявляти зміни у гідрологічних процесах, контролювати рівень опадів, засухи та паводки, що є важливим для адаптації до нових кліматичних умов [3].

Крім того, міжнародні зобов'язання та законодавство вимагають дотримання екологічних стандартів і впровадження сучасних технологій для точного контролю, зокрема супутникового моніторингу, IoT-сенсорів та ГІС-технологій. Моніторинг водних ресурсів дозволяє зменшити ризики, підвищити ефективність управління та забезпечити сталість екосистем [4].

Розвиток технологій значно розширює можливості моніторингу водних ресурсів, забезпечуючи високу точність і оперативність отримання даних. Використання супутникових знімків дозволяє відстежувати зміни у водних екосистемах у глобальному масштабі, зокрема коливання рівня води у річках,

озерах і водосховищах, а також вплив кліматичних змін на їхній стан. Дистанційне зондування та дрони дають змогу проводити локальні дослідження з високою деталізацією, що особливо важливо для контролю якості води [5].

Важливу роль відіграють сенсорні системи й Інтернет речей (IoT), які дають змогу в реальному часі відстежувати фізико-хімічні параметри води, такі як рівень рН, температура, концентрація розчиненого кисню та наявність токсичних речовин. Це дозволяє не лише швидко реагувати на загрози забруднення, а й прогнозувати можливі екологічні ризики, моделювати поширення забруднень і оцінювати вплив різних факторів на стан водних ресурсів [6].

Моніторинг водних ресурсів також є важливим інструментом для розробки ефективної політики управління водним господарством. Він допомагає урядам і міжнародним організаціям впроваджувати заходи щодо раціонального використання води, захисту водойм від виснаження та забруднення, а також адаптації до змін клімату. В умовах глобального потепління та збільшення екстремальних погодних явищ моніторинг дозволяє прогнозувати повені та посухи, допомагаючи зменшити їхні негативні наслідки для економіки.

Значну роль у розвитку систем моніторингу відіграє міжнародне співробітництво, оскільки багато водних об'єктів є транскордонними, а екологічні проблеми не мають державних кордонів. Спільні програми моніторингу та обмін даними між країнами сприяють більш ефективному управлінню водними ресурсами, що, у свою чергу, позитивно впливає на екологічну безпеку та сталий розвиток [7].

Таким чином, сучасний моніторинг водних ресурсів є багатокомпонентною системою, яка поєднує передові технології, наукові дослідження та управлінські рішення. Його актуальність лише зростає в умовах глобальних викликів, що вимагає подальшого розвитку методів збору, аналізу та прогнозування даних. Інвестиції в ці напрями сприятимуть збереженню водних ресурсів, підвищенню якості життя та забезпеченню сталого розвитку суспільства [8].

*Метою кваліфікаційної роботи є автоматизація процесу моніторингу водних ресурсів, зокрема, моніторингу рівня води, температури води, кислотно-лужного*

балансу води, хімічного складу води, швидкості потоку води, наявності домішок у воді шляхом створення кіберфізичної системи моніторингу водних ресурсів.

Поставлена мета досягається розв'язанням таких основних *задач*:

- 1) аналіз відомих методів та рішень для моніторингу водних ресурсів;
- 2) вибір компонентів для кіберфізичної системи моніторингу водних ресурсів;
- 3) розроблення методу діяльності кіберфізичної системи моніторингу водних ресурсів;
- 4) розроблення архітектури кіберфізичної системи моніторингу водних ресурсів;
- 5) проведення експериментів із використанням розробленої кіберфізичної системи моніторингу водних ресурсів.

*Об'єктом дослідження* є процес автоматизації моніторингу водних ресурсів.

*Предметом дослідження* є метод та кіберфізична система моніторингу водних ресурсів.

*Наукова новизна отриманих результатів*: вдосконалено метод діяльності кіберфізичної системи моніторингу водних ресурсів, що відрізняється від існуючих аналогів кіберфізичною інтеграцією (поєднанням фізичних (сенсори, об'єкти) та кібернетичних (аналітика, керування) компонентів) та забезпечує автономність (здатність функціонувати без постійного втручання людини), масштабованість (можливість розширення географії моніторингу), безперервність моніторингу (цілодобове спостереження в реальному часі).

*Практична значущість отриманих результатів* полягає у реалізації кіберфізичної системи моніторингу водних ресурсів, яка забезпечує збір та моніторинг параметрів водних ресурсів у реальному часі.

*Методи дослідження*. Для розв'язання поставлених задач використовуються основні положення системного аналізу (ієрархічності, декомпозиції та ін.), загальної теорії систем, теорії моделювання процесів, теоретико-множинні підходи, методи концептуального моделювання, евристичні оцінки, принципи побудови баз знань та формування логічного висновку.

За темою кваліфікаційної роботи опублікована одна стаття у фаховому науковому журналі України категорії Б (додаток А):

1) Yu. Voichur, A. Balan. Method of operation of the cyber-physical water resources monitoring system. Computer systems and information technologies. 2025. №1. Pp. 48-53. <https://doi.org/10.31891/csit-2025-1-6>

# 1 АНАЛІЗ ВІДОМИХ МЕТОДІВ ТА РІШЕНЬ ДЛЯ МОНІТОРИНГУ ВОДНИХ РЕСУРСІВ

## 1.1 Відомі кіберфізичні системи моніторингу водних ресурсів

Кіберфізична система моніторингу водних ресурсів є комплексом взаємопов'язаних технологічних рішень, що поєднують фізичні компоненти, сенсори, комп'ютерні алгоритми та засоби комунікації для збору, обробки та аналізу даних про стан водного середовища. Вона забезпечує безперервний контроль якості води, її рівня, температури, швидкості течії та інших параметрів, дозволяючи оперативно реагувати на зміни та виявляти потенційні загрози [9].

Основою такої системи є мережа сенсорів та датчиків, розміщених у водоймах, водозабірних пунктах та інших ключових місцях. Вони передають дані через бездротові технології, такі як NB-IoT, LoRaWAN або супутникові канали, до центрів обробки, де інформація аналізується за допомогою штучного інтелекту та алгоритмів машинного навчання. Це дозволяє не лише відслідковувати поточний стан водних ресурсів, а й прогнозувати можливі загрози, зокрема забруднення, посухи або повені.

Такі системи відіграють ключову роль у візуалізації даних, створенні карт забруднень і моделюванні поширення забруднюючих речовин. Використання великих даних (Big Data) дає змогу виявляти закономірності та формувати рекомендації для оптимізації управління водними ресурсами. Такі системи можуть інтегруватися з платформами розумного міста (Smart City) для підвищення ефективності використання води в комунальних службах і промисловості [10].

Кіберфізична система також може включати автоматизовані механізми контролю, наприклад, керування шлюзами або насосними станціями на основі прогнозів і фактичних даних. Це дозволяє мінімізувати вплив природних катастроф, запобігати надмірному використанню водних ресурсів і підтримувати їхню якість на необхідному рівні.

Завдяки своїй адаптивності та інтеграції з хмарними технологіями така система може масштабуватися відповідно до потреб різних регіонів та

забезпечувати сталий розвиток водного господарства. Впровадження кіберфізичних систем у сфері моніторингу водних ресурсів є важливим кроком до ефективного управління природними ресурсами, екологічної безпеки та зменшення негативного впливу людської діяльності на довкілля [11].

Кіберфізична система моніторингу водних ресурсів складається з кількох основних компонентів, які забезпечують її ефективну роботу.

Сенсорна мережа є ключовим елементом системи, оскільки включає різноманітні датчики, що вимірюють параметри води, такі як рівень забруднення, температуру, рН, вміст розчиненого кисню, електропровідність та інші характеристики. Ці сенсори можуть бути розташовані на поверхні водойм, під водою або на берегах і працювати в режимі реального часу [12].

Передавальні технології забезпечують безперервний потік даних від сенсорів до обчислювальних центрів. Вони можуть включати стільниковий зв'язок (3G, 4G, 5G), LPWAN-протоколи (LoRa, NB-IoT), супутниковий зв'язок або дротові з'єднання залежно від умов розміщення та вимог до швидкості передачі даних.

Обчислювальні потужності та аналітичні алгоритми дозволяють обробляти отримані дані, аналізувати їх та формувати прогнози. Використання штучного інтелекту та машинного навчання допомагає виявляти аномалії у водних ресурсах, прогнозувати екологічні загрози та оптимізувати управління водними системами [13].

Геоінформаційні системи (ГІС) забезпечують візуалізацію даних у вигляді інтерактивних карт, на яких відображаються зміни у водних ресурсах. Це допомагає приймати обґрунтовані рішення щодо їхнього управління, відстежувати джерела забруднення та аналізувати просторові закономірності.

Інтерфейси користувача дозволяють фахівцям працювати з системою через спеціальні веб-платформи, мобільні додатки або інтегровані рішення для муніципальних органів влади, підприємств та екологічних служб. Вони надають доступ до поточних і архівних даних, аналітичних звітів та інструментів управління [14].

Автоматизовані системи керування можуть включати механізми реагування, наприклад, регулювання шлюзів, управління насосними станціями або активацію систем очищення води при виявленні небезпечних змін у її складі.

Хмарні технології та сховища даних забезпечують централізоване зберігання та обробку інформації, дозволяючи масштабувати систему відповідно до потреб користувачів та інтегрувати її з іншими екологічними чи промисловими платформами [15].

Таким чином, кіберфізична система моніторингу водних ресурсів об'єднує фізичні, цифрові та аналітичні компоненти для створення ефективного механізму контролю, аналізу та управління станом водних екосистем.

Розвиток кіберфізичних систем для моніторингу водних ресурсів стикається з низкою викликів, які потребують комплексного підходу до їх вирішення [16, 17].

Однією з головних проблем є інфраструктурні обмеження. У багатьох регіонах, особливо в країнах, що розвиваються, відсутня належна технічна база для впровадження розумних сенсорних мереж та IoT-рішень. Недостатній рівень цифровізації та низька якість існуючих водних комунікацій можуть ускладнювати інтеграцію кіберфізичних систем.

Фінансові бар'єри також відіграють важливу роль. Висока вартість впровадження сучасних сенсорів, хмарних платформ та аналітичних алгоритмів може стати перешкодою для урядів і компаній, які хочуть використовувати ці технології. Незважаючи на довгострокові вигоди, такі проекти потребують значних інвестицій.

Ще одним викликом є забезпечення точності та надійності даних. В умовах реального середовища датчики можуть давати похибки через кліматичні фактори, технічні несправності або забруднення. Це вимагає розробки ефективних методів калібрування, самодіагностики та автоматичного коригування даних.

Кібербезпека та захист даних є критично важливими аспектами кіберфізичних систем. Оскільки вони працюють з великим обсягом даних у режимі реального часу, існує ризик хакерських атак та несанкціонованого доступу до

інформації. Розвиток надійних механізмів шифрування, безпечного зберігання та передачі даних є пріоритетним завданням.

Щодо перспектив, кіберфізичні системи моніторингу водних ресурсів мають великий потенціал для вдосконалення завдяки штучному інтелекту та машинному навчанню. Інтеграція алгоритмів аналізу великих даних дозволить точніше прогнозувати зміни у водних екосистемах, передбачати засухи, повені або забруднення.

Значну роль у розвитку таких систем відіграє супутниковий моніторинг та дистанційне зондування Землі. Поєднання супутникових знімків із сенсорними мережами надає більш детальну картину стану водних ресурсів на глобальному рівні, що важливо для контролю змін клімату та управління водним балансом.

Розширення співпраці між державними установами, науковими інститутами та приватним сектором сприятиме масовому впровадженню кіберфізичних систем. Створення відкритих платформ для обміну екологічними даними допоможе підвищити ефективність управління водними ресурсами та розробити більш стійкі водні стратегії.

Загалом, подальший розвиток кіберфізичних систем моніторингу водних ресурсів сприятиме раціональному використанню води, зменшенню екологічних ризиків і забезпеченню стабільного водопостачання для майбутніх поколінь.

Існує кілька відомих кіберфізичних систем моніторингу водних ресурсів, які впроваджені у різних країнах та використовуються для контролю стану водних екосистем.

Smart Water Management System (SWMS) [18-21] – розумна система управління водними ресурсами, яка впроваджується в багатьох країнах для моніторингу якості та кількості води. Вона використовує сенсори, IoT-пристрої, супутникові знімки та алгоритми машинного навчання для аналізу змін у водних ресурсах. Це комплексна кіберфізична система, яка поєднує сучасні технології, такі як Інтернет речей (IoT), штучний інтелект (AI), хмарні обчислення та аналітику великих даних, для ефективного управління водними ресурсами. Основні функції SWMS: 1) моніторинг водних ресурсів у реальному часі – система використовує

датчики для збору інформації про рівень води, її якість, температуру, тиск у трубопроводах, рівень забрудненості та інші параметри; дані передаються на хмарну платформу для подальшої обробки; 2) контроль та оптимізація споживання води – SWMS дозволяє споживачам (містам, підприємствам, домогосподарствам) аналізувати витрати води та знаходити шляхи для їхнього зменшення; розумні лічильники води допомагають ідентифікувати витoki та неефективне використання водних ресурсів; 3) автоматичне виявлення витоків та аварій – завдяки алгоритмам машинного навчання система може виявляти аномалії в роботі водопровідних мереж та сигналізувати про можливі витoki або аварії, що значно знижує втрати води; 4) прогнозування змін у водних ресурсах – SWMS аналізує великі масиви даних (історичні, кліматичні, екологічні) для прогнозування засух, повеней або змін якості води; це допомагає органам управління вчасно реагувати на потенційні загрози; 5) автоматизація процесів у водному господарстві – система може автоматично керувати подачею води, регулювати роботу насосних станцій, активувати системи очищення або перерозподіляти ресурси між різними споживачами; 6) підтримка сталого розвитку та екологічного балансу – SWMS сприяє збереженню водних ресурсів, мінімізує негативний вплив людської діяльності на довкілля та допомагає забезпечити чисту воду для населення. Це інтелектуальна система управління водними ресурсами, яка використовує сучасні цифрові технології для моніторингу, аналізу та оптимізації споживання води в режимі реального часу. Вона інтегрує датчики, що вимірюють витрату води, рівень вологості ґрунту, тиск у трубопроводах та якість води, з аналітичним програмним забезпеченням, здатним прогнозувати потреби у воді, виявляти витoki й неефективне використання. Зібрані дані передаються через бездротові мережі на центральний сервер або в хмару, де вони обробляються для подальшої візуалізації та прийняття управлінських рішень. Завдяки автоматизованому контролю та можливості дистанційного управління, така система дозволяє зменшити втрати води, підвищити ефективність і стабільність водопостачання, а також сприяти екологічній сталості, особливо в умовах обмежених водних ресурсів або змін клімату.

Приклади впровадження SWMS: Singapore Smart Water Grid [22] – розумна система управління водопостачанням у Сінгапурі, яка контролює якість води та оптимізує її розподіл; IBM Intelligent Water Platform [23] – рішення для міст та промисловості, яке допомагає зменшити втрати води та покращити управління водними мережами; Smart Water Pilot Project в Барселоні [24] – інтеграція сенсорів для відстеження споживання води та зменшення витрат. SWMS є важливим інструментом у сфері управління водними ресурсами, оскільки допомагає оптимізувати використання води, підвищити її якість, мінімізувати втрати та запобігати екологічним катастрофам. У майбутньому впровадження таких систем стане ключовим фактором у вирішенні глобальних проблем водопостачання та кліматичних змін.

Sustainable Water Management in Urban China (SWITCH) [25, 26] – система моніторингу водопостачання та стічних вод у Китаї, яка допомагає покращувати управління водними ресурсами в мегаполісах. Вона інтегрує дані від датчиків якості води, кліматичних моделей та ГІС-аналітики. Це міжнародна ініціатива, спрямована на впровадження інтегрованих та стійких підходів до управління водними ресурсами в умовах стрімкої урбанізації Китаю. Проект зосереджувався на створенні водно-екологічних стратегій, які поєднують наукові дослідження, новітні технології та практики сталої урбаністики для покращення якості води, зменшення споживання, повторного використання та ефективного очищення стічних вод. SWITCH сприяв розвитку політик, що враховують складну взаємодію між водною інфраструктурою, навколишнім середовищем і потребами населення, одночасно підтримуючи адаптацію до змін клімату та забезпечення довгострокової водної безпеки. Особлива увага приділялася залученню місцевих громад, органів влади та бізнесу до процесу прийняття рішень, що сприяло формуванню цілісного та інноваційного підходу до водного управління в містах.

River and Lake Water Quality Monitoring System in the European Union (WATERMON) [27] – загальноєвропейська система моніторингу якості води, що працює у рамках Директиви про водну політику ЄС. Вона використовує автоматизовані станції спостереження, які вимірюють фізико-хімічні параметри

води та передають дані в єдину базу для аналізу та управління. Це система, розроблена для постійного спостереження та оцінювання якості води в річках і озерах країн Європейського Союзу відповідно до вимог Водної рамкової директиви ЄС. Система використовує мережу автоматизованих станцій, оснащених датчиками для вимірювання ключових параметрів води, таких як температура, рН, вміст кисню, концентрація нітратів, фосфатів, важких металів та інших забруднювачів. Дані збираються в режимі реального часу та передаються до централізованих платформ для подальшого аналізу, що дозволяє виявляти тенденції погіршення екологічного стану водойм, прогнозувати ризики для водних екосистем і оперативно реагувати на випадки забруднення. WATERMON сприяє прийняттю науково обґрунтованих рішень у сфері охорони водних ресурсів, забезпечує прозорість та доступ громадськості до інформації про стан води, а також підтримує співпрацю між державами-членами ЄС для досягнення спільних екологічних цілей.

India's National Hydrology Project (NHP) [28] – ініціатива уряду Індії, яка використовує кіберфізичні системи для збору та аналізу гідрологічних даних. Включає інтелектуальні сенсорні мережі, аналітику великих даних та прогностичні моделі для управління водними ресурсами. Це масштабна державна ініціатива, спрямована на створення сучасної гідрологічної інфраструктури та зміцнення систем управління водними ресурсами по всій території Індії. Проєкт має на меті забезпечити надійний збір, обробку, зберігання та поширення гідрометеорологічних даних для ефективного прийняття рішень у сфері водокористування, зокрема для потреб сільського господарства, енергетики, управління повеннями та водопостачання. NHP впроваджує єдину цифрову інформаційну платформу, яка об'єднує дані з великої кількості автоматизованих гідрологічних станцій, що вимірюють рівень річок, опади, ґрунтові води, якість води та інші параметри. Система використовує ПС-технології, моделі прогнозування та аналітичні інструменти для підвищення прозорості управління водними ресурсами, а також сприяє інтегрованому водному плануванню між штатами. Особливий акцент проєкту робиться на підвищенні кваліфікації фахівців,

зміцненні інституційного потенціалу та залученні громадськості до збереження водних ресурсів.

Aquarius System (USA & Canada) [29] – кіберфізична система моніторингу водних ресурсів, яка використовується в США та Канаді для контролю якості питної води, управління річками та водосховищами. Вона застосовує IoT, супутниковий моніторинг та хмарні технології для обробки великих обсягів даних. Це сучасна платформа для управління гідрологічними та екологічними даними, яка широко використовується в США та Канаді урядовими установами, дослідницькими організаціями та екологічними агенціями. Система призначена для автоматичного збору, обробки, зберігання та візуалізації великого обсягу даних про водні ресурси, включаючи рівень води, витрату, температуру, якість води та інші параметри з різноманітних джерел, зокрема автоматизованих сенсорів та моніторингових станцій. Aquarius забезпечує високу точність та узгодженість даних, підтримує стандарти міжнародного рівня і дозволяє здійснювати реальний контроль за станом водних об'єктів у режимі онлайн. Інтеграція аналітичних інструментів та моделей дає змогу користувачам здійснювати глибокий аналіз змін у водних екосистемах, прогнозувати гідрологічні події, виявляти аномалії та оперативно реагувати на загрози. Завдяки інтуїтивному інтерфейсу та можливостям спільного доступу до даних, система сприяє прозорому прийняттю рішень, ефективному управлінню водними ресурсами та забезпеченню екологічної сталості.

Smart Water Grid in South Korea [30] – інноваційна система керування водними ресурсами в Південній Кореї, яка використовує кіберфізичні підходи для оптимізації водопостачання та мінімізації втрат води в міських мережах. Це інноваційна система управління водопостачанням, що інтегрує цифрові технології, сенсори, автоматизоване обладнання та штучний інтелект для забезпечення стабільного, ефективного та сталого використання водних ресурсів у міських і промислових зонах. Ця система дозволяє в режимі реального часу контролювати якість і кількість води, виявляти витіки, прогнозувати попит, керувати тиском у мережі та оптимізувати розподіл води відповідно до змінних умов споживання.

Основною метою є підвищення енергоефективності водопровідної інфраструктури, зменшення втрат води та забезпечення безперервного постачання навіть у періоди пікового навантаження або в умовах обмежених ресурсів. Smart Water Grid у Південній Кореї підтримується національними науковими установами, муніципалітетами та промисловими партнерами, що дозволяє впроваджувати інновації на практиці та формувати нові стандарти у сфері водного менеджменту.

Copernicus Programme – Water Monitoring Service – європейська програма супутникового моніторингу, що аналізує стан водойм на основі даних дистанційного зондування Землі. Вона використовується для оцінки рівня забруднення, змін водного балансу та виявлення екологічних загроз. Це європейська система спостереження за водними ресурсами, яка функціонує в межах загальної програми Copernicus, ініційованої Європейським Союзом для моніторингу навколишнього середовища. Служба забезпечує регулярне та детальне спостереження за поверхневими водами, включаючи річки, озера, водосховища та прибережні зони, з використанням супутникових даних, наземних спостережень і моделей. Вона надає інформацію про якість і кількість води, динаміку водного покриття, наявність водоростей, каламутність, температуру та інші ключові параметри, що мають значення для управління водними ресурсами, попередження паводків, планування іригації та охорони екосистем. Дані обробляються в рамках спеціалізованих сервісів, що забезпечують відкритий доступ до науково обґрунтованої інформації для державних органів, дослідників, екологічних організацій і широкої громадськості. Copernicus Water Monitoring Service відіграє критичну роль у формуванні кліматостійкої політики, ранньому виявленні екологічних загроз і підтримці сталого управління водними ресурсами в Європі та за її межами.

Усі ці системи демонструють ефективність використання кіберфізичних технологій для моніторингу водних ресурсів, сприяючи їхньому збереженню, раціональному використанню та своєчасному реагуванню на потенційні загрози.

Ці приклади свідчать про те, що концепція використання кіберфізичних технологій для моніторингу водних ресурсів широко використовується в усьому

світі і має значний потенціал. Наразі така концепція слабо використовується для розвитку українських міст, в основному, через високу вартість, хоча має величезний потенціал для них, особливо під час повоєнної відбудови.

Отже, задача проєктування та розроблення кіберфізичної системи моніторингу водних ресурсів є наразі актуальною для України. Інтеграція інноваційних технологій у цю сферу дозволить не лише покращити управління водними ресурсами, а й створити умови для економічного розвитку та покращення якості життя населення.

Актуальність проєктування та розроблення кіберфізичної системи моніторингу водних ресурсів для України обумовлена необхідністю ефективного управління водними ресурсами в умовах змін клімату, забруднення водойм та зростаючих потреб у водопостачанні. Сучасні виклики, такі як нестача чистої питної води, нераціональне використання ресурсів, аварійний стан водопровідних мереж та екологічні загрози, вимагають запровадження інноваційних технологій. Використання сенсорних мереж, штучного інтелекту та хмарних обчислень дозволяє оперативно отримувати інформацію про якість та кількість води, прогнозувати зміни та запобігати надзвичайним ситуаціям. Впровадження кіберфізичних систем у сфері моніторингу водних ресурсів сприятиме підвищенню ефективності управління водними ресурсами, зменшенню втрат, покращенню екологічного стану водойм та забезпеченню населення якісною водою. Для України, де питання водної безпеки є стратегічним, такі рішення стануть важливим кроком до сталого розвитку та екологічної рівноваги.

Проєктування та розроблення кіберфізичної системи моніторингу водних ресурсів в Україні також сприяє інтеграції країни в міжнародні ініціативи з охорони довкілля та сталого використання природних ресурсів. Запровадження таких систем дозволить адаптувати управління водними ресурсами до європейських стандартів та забезпечити відповідність екологічним нормам. Завдяки застосуванню технологій Інтернету речей (IoT), великих даних (Big Data) та штучного інтелекту можна автоматизувати процеси збору, аналізу та

прогнозування, що допоможе оптимізувати водокористування, запобігати забрудненню та підвищувати ефективність водних інфраструктур.

Крім того, розвиток кіберфізичних систем сприятиме формуванню сучасної цифрової екосистеми для моніторингу та управління водними ресурсами, що залучить державні органи, наукові установи, бізнес та громадськість до спільного вирішення проблем водного сектору. Використання цифрових моделей та симуляцій дозволить аналізувати сценарії розвитку водної ситуації, виявляти потенційні ризики та планувати заходи з мінімізації негативних наслідків.

Особливе значення має впровадження таких систем у контексті екологічної безпеки промислових регіонів, де забруднення води може мати катастрофічні наслідки для довкілля та здоров'я населення. Створення ефективної системи моніторингу дозволить не лише контролювати якість води в режимі реального часу, а й вчасно реагувати на аварійні ситуації, що особливо важливо для водосховищ, річок та підземних джерел.

## 1.2 Параметри моніторингу водних ресурсів

Визначення параметрів моніторингу водних ресурсів полягає у встановленні кількісних та якісних характеристик водного середовища, які підлягають систематичному спостереженню для оцінки стану, змін і впливу природних або антропогенних чинників на водні ресурси. До таких параметрів зазвичай належать фізичні (температура, прозорість, колір, каламутність), хімічні (рН, вміст кисню, нітрати, фосфати, важкі метали, органічні забруднювачі), біологічні (наявність фітопланктону, зоопланктону, бактеріальне забруднення) та гідрологічні показники (рівень води, витрата, швидкість течії, площа водного дзеркала). Вибір параметрів залежить від цілей моніторингу – чи це контроль якості питної води, екологічний нагляд, управління паводками або забезпечення водного балансу. Комплексне вимірювання та аналіз цих параметрів дозволяє своєчасно виявляти відхилення, оцінювати тенденції змін, розробляти прогнози й ефективно управляти водними ресурсами на локальному, регіональному чи національному рівні [31-34].

Моніторинг водних ресурсів є надзвичайно важливим, оскільки він забезпечує надійні дані про кількість, якість та динаміку води, що є основою для ефективного управління, планування та охорони водного середовища. Завдяки регулярному спостереженню можна своєчасно виявляти забруднення, деградацію водних екосистем, наслідки змін клімату, дефіцит води або надлишкове використання. Це дозволяє запобігати екологічним катастрофам, зменшувати ризики для здоров'я населення, підтримувати біорізноманіття та гарантувати сталість водопостачання для сільського господарства, промисловості й побуту. У стратегічному плані моніторинг є ключовим інструментом для ухвалення рішень на місцевому, національному та глобальному рівнях, забезпечення продовольчої та водної безпеки, а також досягнення цілей сталого розвитку [35-37].

Основні параметри моніторингу водних ресурсів включають [38-42]:

1. Рівень води – один із ключових параметрів моніторингу водних ресурсів, оскільки він відображає загальний стан водного об'єкта, його динаміку та чутливість до природних і антропогенних змін. Регулярне вимірювання рівня води дозволяє контролювати сезонні коливання, оцінювати обсяги доступних водних ресурсів, прогнозувати посухи або паводки, а також забезпечувати належну роботу гідротехнічних споруд, таких як дамби, водосховища чи іригаційні системи. Коливання рівня можуть свідчити про зміну кліматичних умов, надмірне водоспоживання або забруднення, що порушує природний баланс. Крім того, інформація про рівень води є критично важливою для забезпечення безпеки населення, попередження надзвичайних ситуацій та формування довгострокових водогосподарських стратегій [43, 44].

2. Температура води – важливий параметр моніторингу водних ресурсів, оскільки вона значно впливає на екосистеми водойм, біологічні процеси та якість води. Від температури залежить розчиненість кисню, активність водних організмів, а також швидкість хімічних реакцій у воді, що визначає її чистоту та безпеку для використання. Підвищення температури може спричинити зменшення рівня кисню, що негативно впливає на рибу та інші водні організми, а також сприяє розвитку шкідливих водоростей і бактеріальних інфекцій. Зміни температури води

також можуть бути індикатором зміни клімату, забруднення або зміни в екологічному стані водойм. Моніторинг температури води дозволяє своєчасно виявляти негативні тенденції, що допомагає вжити необхідних заходів для охорони водних ресурсів та збереження біорізноманіття [45, 46].

3. Кисотно-лужний баланс води або рН – важливий параметр моніторингу водних ресурсів, оскільки він безпосередньо впливає на здатність води підтримувати життя та здоров'я водних екосистем. Значення рН води визначає її кислотність або лужність, що впливає на розчинність різних хімічних сполук, доступність поживних речовин та загальний стан екосистеми. Нормальні коливання рН важливі для підтримки стабільного середовища для водних організмів, таких як риба, водорості та мікроорганізми. Зміни в кислотно-лужному балансі можуть свідчити про забруднення води, наприклад, через скидання кислотних або лужних відходів, що здатне викликати серйозні порушення в екосистемах, знижуючи біорізноманіття або навіть спричиняючи загибель водних організмів. Моніторинг рН допомагає виявляти аномалії, оперативно реагувати на зміни та запобігати екологічним катастрофам, що робить цей параметр критично важливим для охорони водних ресурсів і сталого управління водними системами.

4. Хімічний склад води – один із найважливіших параметрів моніторингу водних ресурсів, оскільки він безпосередньо визначає якість води та її придатність для різних цілей, таких як питне водопостачання, сільське господарство, промисловість і збереження екологічного балансу. Хімічні компоненти води, включаючи різні розчинені солі, органічні і неорганічні речовини, можуть впливати на здоров'я водних екосистем і людей. Наприклад, наявність високих концентрацій важких металів, нітратів, фосфатів або пестицидів може призводити до забруднення води, порушення нормального розвитку водних організмів і навіть до загрози для людського здоров'я. Зміни в хімічному складі води часто є індикатором антропогенних впливів, таких як промислові скиди або сільськогосподарське забруднення, а також природних процесів, таких як ерозія чи вивітрювання. Моніторинг хімічного складу дозволяє своєчасно виявляти

забруднення, контролювати його джерела і вживати необхідні заходи для підтримки якості води на належному рівні [47, 48].

5. Швидкість потоку води – важливий параметр моніторингу водних ресурсів, оскільки вона має прямий вплив на екологічний стан водних об'єктів і функціонування гідрологічних систем. Швидкість течії визначає транспортування осадових матеріалів, поживних речовин, забруднювачів та кисню у водному середовищі. Це, у свою чергу, впливає на водні екосистеми, їх біорізноманіття і здатність організмів адаптуватися до змін. Наприклад, швидкість потоку може визначати розподіл органічних матеріалів, таких як водорості або частинки, та визначати умови для нересту риб або міграції інших водних видів. Зміни в швидкості течії можуть бути ознакою змін у кліматі, будівництві гідротехнічних споруд або інших антропогенних впливів, таких як зміна використання землі чи води. Моніторинг швидкості потоку води допомагає зрозуміти динаміку водного середовища, прогнозувати паводки, оптимізувати використання водних ресурсів та забезпечувати екологічну стабільність водних екосистем [49, 50].

6. Наявність домішок у воді – важливий параметр моніторингу водних ресурсів, оскільки домішки можуть значно впливати на якість води, її безпеку та придатність для різних цілей, таких як питне водопостачання, сільське господарство або збереження екосистем. Домішки можуть бути як органічними, так і неорганічними, і включати різноманітні хімічні речовини, важкі метали, пестициди, токсичні сполуки або біологічні контамінанти, що потрапляють у воду через промислові скиди, сільське господарство, побутові відходи або природні процеси. Підвищений рівень домішок може призвести до забруднення води, погіршення її якості та загрози для здоров'я людей, тварин і водних організмів. Наприклад, домішки можуть знижувати розчинність кисню у воді, що порушує життєдіяльність водних видів, або викликати токсичні ефекти при їх накопиченні в організмах. Моніторинг наявності домішок дозволяє своєчасно виявляти забруднення, оцінювати його ступінь та вжити заходів для очищення води, що є критично важливим для забезпечення її сталого використання і захисту екосистем [51, 52].

Ці параметри є ключовими для визначення стану водних ресурсів. Визначення таких параметрів води є важливим, оскільки ці показники дозволяють оцінити якість водних ресурсів, їх придатність для споживання, зрошення, промислових потреб та збереження екосистем. Параметри, такі як рівень води, температура, рН, хімічний склад та наявність домішок, дають можливість виявити зміну стану водоюм у реальному часі, що є критично важливим для своєчасного реагування на потенційні загрози, такі як забруднення, екологічні катастрофи або порушення в екосистемах. Зокрема, це дозволяє забезпечити безпеку питної води, оптимізувати водоспоживання в сільському господарстві та промисловості, а також попереджати негативні наслідки, пов'язані з погіршенням якості води, як для людей, так і для живих організмів у водному середовищі. Моніторинг таких параметрів є основою для формування ефективних стратегій управління водними ресурсами, підтримки екологічної стабільності та збереження здоров'я водних екосистем [53-55].

Основні аспекти моніторингу водних ресурсів включають в себе кілька ключових напрямків, які дозволяють забезпечити сталий і ефективний контроль за станом водних об'єктів. Одним із таких аспектів є якість води, що включає вимірювання параметрів, як-от рівень забруднення, наявність домішок, кислотно-лужний баланс та хімічний склад води. Це допомагає оцінити її придатність для різних цілей, таких як питне водопостачання або сільське господарство [56, 57].

Другим важливим аспектом є кількість води, яка визначається через вимірювання рівня води, витрати та обсяги води в річках, озерах, водосховищах тощо. Ці дані є основою для оцінки водного балансу, прогнозування паводків або посух та ефективного управління водними ресурсами [58-61].

Ще одним аспектом є екологічний моніторинг, який включає вивчення стану водних екосистем і впливу на них антропогенних і природних чинників. Це дозволяє оцінювати біорізноманіття водних об'єктів і вплив змін клімату або забруднення на життєдіяльність водних організмів [62-65].

Технічний моніторинг також є важливим, адже він включає контроль за станом гідротехнічних споруд (дамб, водосховищ, каналів) і інфраструктури водопостачання, що забезпечує надійність систем водопостачання та водовідведення [66-70].

Загалом, моніторинг водних ресурсів є основою для розробки ефективних стратегій управління водними ресурсами, запобігання екологічним катастрофам, забезпечення сталого використання води та захисту здоров'я населення та екосистем.

### 1.3 Висновки. Постановка задачі

Актуальність кіберфізичної системи моніторингу водних ресурсів для України зумовлена кількома важливими факторами, що визначають необхідність впровадження таких технологій для сталого управління водними ресурсами [71-73].

По-перше, Україна стикається з серйозними викликами щодо водних ресурсів, зокрема через недостатність води в деяких регіонах, забруднення водойм, а також через зміни клімату, що спричиняють зміну режиму опадів і підвищення температури. Кіберфізична система дозволяє своєчасно отримувати дані про стан водних ресурсів, швидко реагувати на зміни та ефективно управляти водними ресурсами, щоб мінімізувати негативні наслідки від таких змін [74, 75].

По-друге, сучасні методи моніторингу, які використовують фізичні датчики, аналізують хімічний склад води, її рівень, температуру та інші параметри, забезпечують більш точну і оперативну інформацію про стан водойм. Це дає змогу виявляти забруднення на ранніх етапах і вживати необхідних заходів для запобігання екологічним катастрофам, а також для оптимізації водоспоживання в сільському господарстві та промисловості [76, 77].

По-третє, в умовах зміни клімату та зростаючого попиту на воду для різних галузей економіки Україні необхідно розвивати інноваційні підходи до управління водними ресурсами. Кіберфізичні системи можуть стати ключовим інструментом для інтеграції даних із різних джерел і автоматизації процесів прийняття рішень, що дозволяє оптимізувати використання води та знизити втрати [78, 79].

З огляду на ці фактори, впровадження кіберфізичних систем моніторингу водних ресурсів є важливим кроком до забезпечення сталого управління водними ресурсами в Україні, що сприятиме збереженню екологічного балансу, покращенню якості води та ефективному використанню цього важливого ресурсу [80, 81].

*Метою кваліфікаційної роботи є автоматизація процесу моніторингу водних ресурсів, зокрема, моніторингу рівня води, температури води, кислотно-лужного балансу води, хімічного складу води, швидкості потоку води, наявності домішок у воді шляхом створення кіберфізичної системи моніторингу водних ресурсів.*

*Поставлена мета досягається розв'язанням таких основних задач:*

- 1) аналіз відомих методів та рішень для моніторингу водних ресурсів;*
- 2) вибір компонентів для кіберфізичної системи моніторингу водних ресурсів;*
- 3) розроблення методу діяльності кіберфізичної системи моніторингу водних ресурсів;*
- 4) розроблення архітектури кіберфізичної системи моніторингу водних ресурсів;*
- 5) проведення експериментів із використанням розробленої кіберфізичної системи моніторингу водних ресурсів.*

*Об'єктом дослідження є процес автоматизації моніторингу водних ресурсів.*

*Предметом дослідження є метод та кіберфізична система моніторингу водних ресурсів.*

## 2 ВИБІР КОМПОНЕНТІВ ДЛЯ КІБЕРФІЗИЧНОЇ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ ВОДНИХ РЕСУРСІВ

### 2.1 Нижній рівень кіберфізичної системи моніторингу водних ресурсів

Кіберфізична система моніторингу водних ресурсів (КФС) – це інтегрована система, яка поєднує фізичні датчики, програмне забезпечення, комунікаційні мережі та аналітичні алгоритми для збору, обробки та аналізу даних про стан водних ресурсів у реальному часі. Така система дозволяє автоматизувати процеси моніторингу, забезпечуючи точну та оперативну інформацію про якість води, рівень води, швидкість потоку, температуру, хімічний склад та інші параметри, що впливають на водні екосистеми і водне господарство.

Кіберфізична система працює на трьох основних рівнях:

1. Нижній рівень складається з датчиків, які безпосередньо вимірюють фізичні та хімічні параметри води, такі як рН, температура, рівень забруднень, концентрація розчинених солей, кисню, а також швидкість потоку і рівень води.

2. Середній рівень – це система контролерів, які здійснюють збір і передачу даних від датчиків до центральної бази даних або до програмного забезпечення для подальшої обробки.

3. Верхній рівень – аналітичне програмне забезпечення, яке здійснює обробку отриманих даних, аналізує їх і формує прогнози чи рекомендації. Це програмне забезпечення може використовувати алгоритми для виявлення аномалій або змін у водних ресурсах, а також для автоматизації прийняття рішень.

Основною метою кіберфізичної системи є забезпечення надійного, точного та безперервного моніторингу стану водних ресурсів, що дозволяє вчасно виявляти зміни в їх стані, прогнозувати екологічні та гідрологічні ризики, такі як паводки, засухи або забруднення. Це дозволяє органам влади, екологічним службам, аграріям та іншими користувачам водних ресурсів оперативно реагувати на загрози, оптимізувати використання води та знижувати негативний вплив на довкілля.

У контексті України, впровадження такої системи є важливим для покращення управління водними ресурсами, особливо з огляду на актуальні проблеми, такі як забруднення водойм, нестача води в окремих регіонах, а також зміни клімату, що призводять до нерівномірного розподілу водних ресурсів. Кіберфізична система моніторингу може стати основою для ефективного управління водними ресурсами та забезпечення сталого розвитку країни.

Основними параметрами, які буде визначати розроблювана кіберфізична система, будуть: рівень води, температура води, кислотно-лужний баланс води, хімічний склад води, швидкість потоку води, наявність домішок у воді.

Датчики для вимірювання рівня води – це прилади, які дозволяють точно визначати висоту водяного стовпа у водоймах, резервуарах, річках чи інших об'єктах у режимі реального часу. Вони є ключовими елементами систем моніторингу водних ресурсів і використовуються для запобігання паводкам, управління водопостачанням, іригаційними системами та захисту інфраструктури.

Найпоширенішими типами таких датчиків є:

1. Ультразвукові датчики – визначають рівень води шляхом вимірювання часу, за який звуковий імпульс проходить до поверхні води і повертається назад. Вони безконтактні, точні та стійкі до забруднення.

2. Гідростатичні датчики (тискові) – вимірюють тиск стовпа води, що тисне на сенсор, і на основі цього розраховують рівень. Часто використовуються в колодязях і водосховищах.

3. Лазерні датчики – подібні до ультразвукових, але використовують лазерний промінь для точнішого вимірювання. Добре працюють на великих відстанях і в складних умовах.

4. Радарні датчики – працюють за принципом радіохвильового зондування, стійкі до туману, пилу та температурних змін, тому ефективні у відкритому середовищі.

5. Поплавкові датчики – традиційна механічна система з поплавком, що змінює положення залежно від рівня води. Простий і дешевий варіант, але менш точний порівняно з електронними.

Вибір конкретного типу датчика залежить від умов експлуатації, необхідної точності, бюджету та масштабів моніторингу.

Порівняльний аналіз популярних датчиків для вимірювання рівня води, які можуть бути інтегровані в кіберфізичну систему моніторингу водних ресурсів, представлений в Таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Порівняльний аналіз датчиків для вимірювання рівня води

Модель	Тип	Діапазон	Живлення	Комунікація	Особливості	Ціна, USD
YoLink LoRa Smart Sensor	Поплавковий, бездротовий	До 5 м	2 × AAA батареї	LoRa (довгий радіус дії)	Підтримка мобільного застосунку, 105 дБ сирена, сповіщення через SMS, email, застосунок	35
Risinglink Smart Monitor	Поплавковий, Wi-Fi	До 6.5 м	3 × AAA батареї	Wi-Fi	Нержавіюча сталь, сповіщення через SMS та email, зовнішнє використання	95
EPTTECH TLC2206	Ємнісний Wi-Fi	До 10 м	220V AC	Wi-Fi (через TUYA)	Підходить для води, палива, олії;	56

Продовження таблиці 2.1

					підтримка до 10 датчиків	
PTLevel Wireless Monitor	Гідростатичний, бездротовий	До 10 м	4 × AA батареї	Пропрієтарна бездротова мережа	Дальність до 1 км, онлайн-доступ, історія вимірювань	309
Proteus L5 Wi-Fi Sensor	Поплавковий, Wi-Fi	До 3 м	100–240V AC	Wi-Fi	Сповіщення через email, SMS, голосові дзвінки; вбудований зумер	99
Shonmau High/Low Detector	Поплавковий, дротовий	До 5 м	9V батарея	Локальна сигналізація	120 дБ сирена, регульована гучність, подовжуваний кабель до 16.4 футів	20
Gill LevelPro	Гідростатичний	До 2 м	5–32V DC	0.25–4.75V або 4–20 мА	Нержавіюча сталь, ±2% точність	300

Кінець таблиці 2.1

WIKА 612.21	Ультразвуковий, безконтактний	0.25–10 м	24V DC	4–20 мА	Висока точність, не потребує обслуговування	400
Madison M8750	Поплавковий, бічний монтаж	До 1 м	24V DC	Релейний вихід	Поліпропілен, сертифікати CE, UL, CSA, NSF	500

Для домашнього використання або невеликих систем датчики YoLink та Risinglink пропонують доступні бездротові рішення з мобільними сповіщеннями. Для промислових або віддалених об'єктів датчик RTLevel забезпечує велику дальність зв'язку та онлайн-моніторинг, що ідеально підходить для резервуарів та колодязів. Для агресивних середовищ або високої точності датчики Gill LevelSlick та WIKА 612.21 пропонують надійність та точність для складних умов експлуатації. Для бюджетних рішень датчики Shonmau та Madison M8750 є простими у встановленні та обслуговуванні, підходять для базових потреб моніторингу.

Для вимірювання рівня води у кіберфізичній системі моніторингу водних ресурсів використовуватимемо датчик *Risinglink Smart Monitor* (рис. 2.1), який має гарне співвідношення ціни та діапазону вимірювань, автономне живлення та комунікацію через поширений протокол Wi-Fi, а також є рішенням з мобільним сповіщенням, що є дуже зручним для реалізації кіберфізичної системи.



Рис. 2.1 – Датчик Risinglink Smart Monitor для вимірювання рівня води

Датчик Risinglink Smart Monitor є поплавковим датчиком з нержавіючої сталі, який пропонує чудову надійність та довговічність порівняно з пластиковими альтернативами, а також оснащений 3-метровим кабелем для додаткової зручності.

Підтримує сповіщення електронною поштою та повідомленнями про високий або низький рівень води, повернення рівня води до норми, низький заряд батареї та відключення пристрою від мережі (втрата з'єднання Wi-Fi). Risinglink дозволяє зареєструвати 2 номери телефонів та 4 адреси електронної пошти на один пристрій. Запатентований алгоритм запобігає повторним сповіщенням, що спрацювають через підстрибування води. Після спрацювання сповіщення про рівень води пристрій перевіряє рівень води кожні 5 хвилин до нормалізації, а потім надсилає повідомлення про скасування сповіщення.

Датчик Risinglink Smart Monitor має живлення від 3 батарейок типу AAA, які входять до комплекту, що усуває потребу в розетці. Завдяки розумному керуванню

живленням ці нові батарейки можуть працювати роками за умов нормального використання та хорошого сигналу Wi-Fi. Користувачу надсилається сповіщення про низький рівень заряду батареї, коли рівень заряду падає нижче 20%.

Датчик готовий до використання на відкритому повітрі – головний контролер розроблений для використання на відкритому повітрі та має водонепроникний клас захисту IP65, що забезпечує довговічність та захист від негоди. Поплавковий датчик з нержавіючої сталі легко встановити. Завдяки власній вазі, поплавковий датчик просто підвішується, без потреби в монтажному кронштейні.

Датчики для вимірювання температури води – це спеціалізовані прилади, призначені для точного визначення температури в річках, озерах, водосховищах, трубопроводах, колодязях та інших водних середовищах. Вони широко використовуються в системах моніторингу водних ресурсів, промисловості, аграрному секторі, охороні довкілля та гідрометеорології.

Основними характеристиками таких датчиків є:

1) тип чутливого елементу – термістори (NTC або PTC), терморезистори або термоперетворювачі опору (RTD, наприклад PT100 або PT1000). RTD вирізняються високою точністю і стабільністю, тоді як термістори швидко реагують на зміни температури;

2) діапазон вимірювання – зазвичай варіюється від -20 °C до +100 °C, проте існують моделі, здатні працювати і в екстремальних умовах, до +200 °C або навіть нижче нуля для льодових середовищ;

3) матеріали корпусу – для захисту від корозії та впливу хімічних речовин корпуси часто виготовляють з нержавіючої сталі, пластику, тефлону або епоксидних смол;

4) вихідні сигнали – аналогові (наприклад, 4–20 мА, 0–10 В) або цифрові (RS485, Modbus, SDI-12, 1-Wire), що дозволяє легко інтегрувати їх у сучасні кіберфізичні системи моніторингу;

5) спосіб встановлення – можуть бути занурюваними, вставними (в трубопровід), поверхневими або комбінованими з іншими сенсорами (наприклад, датчиками рН або електропровідності).

Ці датчики є ключовими для розуміння термічного режиму водойм, виявлення змін у середовищі, моделювання екосистем, а також управління процесами водопідготовки, охолодження або нагріву в інженерних системах.

Порівняльний аналіз датчиків для вимірювання температури води представлений у Таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Порівняльний аналіз датчиків для вимірювання температури води

Модель	Тип	Діапазон	Точність	Інтерфейс	Особливості	Ціна, USD
НОВО MX2201	Терморезистор (NTC)	-20°C до +70°C	±0.5°C	Bluetooth  Low Energy	Водонепро- никний, автономний, мобільний застосунок	80
Solinst Model 301	RTD (Pt100)	-20°C до +80°C	±0.05°C	SDI-12, Modbus, 4–20 mA	Підходить для глибоко- водного моніторингу, висока точність	500
Campbell Scientific 109SS	Терморезистор (NTC)	-40°C до +70°C	±0.02°C	Аналого- вий (мВ)	Корпус з нержавіючої сталі, швидкий відгук	300
YoLink LoRa	Терморезистор	-40°C до +85°C	±0.3°C	LoRa (до 400 м)	Бездротовий, мобільне сповіщення,	35

Кінець таблиці 2.2

Temp Sensor					інтеграція з Home Assistant	
Ambient Weather WH31P	Терморезистор	-40°C до +60°C	±1°C	RF (433 МГц)	Водонепроникний зонд, сумісність з метеостанціями	30
Global Water WQ101	Терморезистор	-5°C до +50°C	±0.1°C	Аналоговий (0–5 В)	Промисловий корпус, тривалий термін служби	650
NexSens TS210	Терморезистор	-40°C до +80°C	±0.1°C	RS-485, SDI-12	Можливість підключення до 16 зондів, глибоководне занурення	1000
Thermosalinograph SBE 21	Терморезистор + провідність	-5°C до +35°C	±0.002°C	RS-232	Судновий моніторинг, вимірювання температури та солоності	3000

Для екологічного моніторингу підходить датчик НОВО MX2201 – автономний, простий у використанні, ідеальний для польових досліджень. Для високоточного моніторингу датчики Solinst Model 301 та Campbell Scientific 109SS забезпечують високу точність і надійність у складних умовах. Для бездротових

систем датчик YoLink LoRa Temp Sensor є економічним рішенням з великим радіусом дії та інтеграцією в розумні системи. Для промислового використання датчики Global Water WQ101 та NexSens TS210 підходять для тривалого використання в складних умовах. Для суднового моніторингу використовується датчик Thermosalinograph SBE 21 – спеціалізований прилад для вимірювання температури та солоності в морських умовах.

Вибір конкретної моделі залежить від вимог до точності, умов експлуатації, необхідності бездротового зв'язку та бюджету.

Враховуючи проведений порівняльний аналіз, для реалізації нашої кіберфізичної системи моніторингу водних ресурсів використовуватимемо *датчик НОВО MX2201* (рис. 2.2) для вимірювання температури води.



Рис. 2.2 – Датчик НОВО MX2201 для вимірювання температури води

Водонепроникний датчик, який використовує Bluetooth для передачі точних вимірювань температури безпосередньо на мобільний пристрій або комп'ютер з Windows. Розроблений для довговічності, ідеально підходить для вимірювання температури в струмках, озерах, океанах та ґрунтових середовищах.

Особливості датчика НОВО MX2201 для вимірювання температури води:

- зручне бездротове налаштування та завантаження через Bluetooth;
- монтажний черевик у комплекті;
- велика пам'ять зберігає 96 000 вимірювань;
- водонепроникність до 30 метрів (100 футів);
- змінний акумулятор;
- монтажні вставки для швидкого та легкого розгортання;
- світлодіодний індикатор показує, коли температура перевищує встановлений поріг;
- можливість встановлення візуальних сигналів тривоги при перевищенні заданих температурних порогів;
- точність  $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$  ( $\pm 0,9^{\circ}\text{F}$ ).

Перевагами такого датчика є: простота встановлення та використання без необхідності додаткового обладнання; висока точність та стабільність вимірювань; можливість тривалого автономного використання завдяки енергоефективному Bluetooth; стійкість до занурення у воду до 30,5 м, що дозволяє використовувати пристрій у різноманітних водних середовищах. Цей датчик є ідеальним вибором для екологічного моніторингу, наукових досліджень, аграрного сектора та інших галузей, де необхідне точне та надійне вимірювання температури у водному середовищі. Він ідеально підходить для моніторингу температури в річках, озерах, океанах, ґрунті та інших середовищах, де потрібна висока точність і надійність.

Датчики для вимірювання кислотно-лужного балансу (рН) води – це спеціалізовані прилади, призначені для визначення концентрації іонів водню ( $\text{H}^+$ ) у водному середовищі, що дозволяє оцінити рівень кислотності або лужності води. Вони є ключовими елементами систем моніторингу якості води в природних водоймах, сільському господарстві, аквакультурі, промисловості, лабораторних дослідженнях і системах очищення стічних вод.

Основними характеристиками таких датчиків є:

1) принцип дії – ґрунтується на електрохімічному вимірюванні потенціалу між рН-електродом і електродом порівняння;

2) діапазон вимірювання – зазвичай охоплює шкалу від 0 до 14 рН, де 7 – нейтральне середовище, менше 7 – кисле, більше 7 – лужне;

3) точність – у сучасних датчиків становить від  $\pm 0,1$  до  $\pm 0,01$  рН, залежно від моделі та умов калібрування;

4) калібрування – більшість датчиків потребують періодичного калібрування за допомогою стандартних буферних розчинів (зазвичай 4, 7 і 10 рН) для забезпечення точності;

5) матеріали корпусу – часто використовуються скло, полімери або композитні матеріали, стійкі до хімічного впливу;

6) інтерфейси підключення – аналогові (мВ) або цифрові (наприклад, Modbus, SDI-12, RS485), що дозволяє інтегрувати їх у автоматизовані або кіберфізичні системи;

7) особливості експлуатації – рН-датчики є чутливими до забруднень, температури та механічного впливу, тому часто оснащуються температурними сенсорами для автоматичної компенсації та потребують періодичного обслуговування або заміни електроліту.

Такі датчики є незамінними для своєчасного виявлення змін у хімічному складі води, виявлення забруднень, контролю за процесами біологічного очищення та підтримки оптимальних умов у біосистемах.

Порівняльний аналіз датчиків для вимірювання кислотно-лужного балансу (рН) води представлений в Таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 – Порівняльний аналіз датчиків для вимірювання кислотно-лужного балансу (рН) води

Модель	Діапазон рН	Діапазон температур	Точність	Інтерфейс	Особливості	Ціна, USD
Mettler Toledo 52003821	0–14	0–100 °C	$\pm 0,01$ рН	Аналоговий (мВ)	Швидкий відгук (<30 с),	965

Продовження таблиці 2.3

					стійкість до тиску до 100 psig, підходить для промислових процесів	
OPTeX SE-pH-D	0–14	0–60 °C	±0,01 pH	MODBUS (цифровий)	Вбудований температурний сенсор, живлення 6–40 VDC, корпус з PPS, довжина кабелю 6 м	345
Badger Meter Q22PX	0–14	Залежить від моделі	±0,1 pH	Аналоговий (мВ або 0–2 VDC)	Не потребує зовнішнього живлення, універсальний вихід, сумісний з більшістю аналізаторів pH	555
PASCO Wireless pH Sensor	0–14	0–80 °C	±0,01 pH	Bluetooth	Бездротовий, автономна робота до 2–3 років, підходить для	110

Кінець таблиці 2.3

(PS-3204)					польових досліджень та навчальних цілей
-----------	--	--	--	--	---

Ці моделі охоплюють широкий спектр потреб: від простих мобільних рішень до високоточних промислових сенсорів. Вибір конкретного датчика залежить від умов експлуатації, вимог до точності, способу підключення та бюджету.

Враховуючи проведений порівняльний аналіз, для реалізації нашої кіберфізичної системи використовуватимемо датчик *PASCO Wireless pH Sensor (PS-3204)* (рис. 2.3), який має низьку ціну та бездротове з'єднання через Bluetooth, що забезпечує зручність у використанні та передачі даних.



Рис. 2.3 – Датчик PASCO Wireless pH Sensor (PS-3204) для вимірювання кислотно-лужного балансу (pH) води

Бездротовий цифровий датчик pH PASCO дозволяє отримувати дані про рівень кислотності розчину безперервно або через заданий часовий інтервал у процесі дослідження якості води, вивчення побутових рідин тощо.

Бездротовий цифровий датчик pH PASCO за допомогою технології Bluetooth підключається безпосередньо до пристрою – смартфона, планшета або ПК.

pH-зонд, заповнений гель-електролітом, а також міцний корпус, стійкий до вологи, пилу та попадання твердих речовин, робить цей датчик ідеальним приладом для роботи в різноманітних умовах.

Особливості та переваги: безпроводне підключення (забезпечує зручність у використанні та зменшує ризик пошкодження кабелів), автономний режим запису (дозволяє проводити довготривалі експерименти без постійного підключення до пристрою), сумісність з іншими електродами (можливість підключення іон-селективних електродів (ISE) та електродів окисно-відновного потенціалу (ORP)), простота у використанні (інтуїтивно зрозумілий інтерфейс та легке підключення), компактний та легкий дизайн (зручний для використання в польових умовах).

Цей датчик є ідеальним вибором для тих, хто шукає надійний, точний та зручний інструмент для вимірювання pH у різноманітних умовах. Його функціональність та простота у використанні роблять його популярним серед викладачів, студентів та дослідників.

Датчики для встановлення хімічного складу води призначені для визначення концентрації різних хімічних речовин та елементів, що містяться у водному середовищі. Вони відіграють ключову роль у моніторингу якості води, виявленні забруднень та оцінці її придатності для питного, промислового чи екологічного використання. Такі датчики можуть аналізувати як окремі елементи (наприклад, нітрати, амоній, фосфати, хлориди, залізо), так і загальні показники (провідність, окисно-відновний потенціал, загальна жорсткість, вміст розчиненого кисню тощо).

Залежно від типу, вони працюють за різними принципами: електрохімічним, фотометричним, спектрофотометричним або оптичним. Деякі моделі здатні проводити мультипараметричний аналіз, тобто одночасно вимірювати кілька показників, що зменшує потребу в додатковому обладнанні. Такі датчики можуть бути портативними або стаціонарними, працювати автономно або в складі кіберфізичних систем з передачею даних у хмару для подальшої обробки та аналізу.

Їх застосування охоплює екологічний моніторинг, контроль на водоочисних станціях, сільське господарство, рибне господарство, харчову промисловість та наукові дослідження.

Датчик HI98195 Multiparameter Water Quality Meter є водонепроникним портативним багатопараметричним вимірювачем, який контролює до 9 різних параметрів якості води. Він оснащений швидкісним з'єднанням, яке забезпечує водонепроникне з'єднання з вимірювачем. Зонд передає показники в цифровому вигляді на вимірювач, де точки даних можуть відображатися та реєструватися. Вся система проста в налаштуванні та використанні.

Датчик Apure KPS-400 Multiparameter Water Quality Sensor є багатопараметричним датчиком якості води Apure KPS-400, має інтегровану конструкцію, надійний та простий у використанні. Одночасно можна підключити до чотирьох цифрових датчиків (5 параметрів). Інші можна налаштувати індивідуально. Вимірювані параметри включають розчинений кисень, рН, ОРР, провідність, каламутність, солоність, аміачний азот тощо. Використовується режим підключення RS485, протокол зв'язку Modbus/RTU.

Датчик Yosemitech Y4001 Handheld Multiparameter Water Quality Meter є портативним багатопараметричним вимірювачем якості води Y600-A та Y4001, який призначений для вимірювання ОРР, оптичного розчиненого кисню, провідності, каламутності, солоності тощо. Дисплей з підсвічуванням, короткі інтерфейси, проста клавіатура, зручні процедури калібрування, акумуляторна батарея, велика пам'ять журналу та потужна програма для ПК (Meter Read) роблять прилад зручним для користувача.

Датчик Manta 2 Multiparameter Water Quality Sonde підходить для використання в будь-якій природній воді від  $-5^{\circ}\text{C}$  до  $50^{\circ}\text{C}$ . Його можна використовувати як автономний логер, для точкового тестування та профілювання за допомогою планшета/КПК або встановлювати разом із бездротовими телеметричними системами. Ідеальні області застосування такого зонда якості води включають взаємодію з ґрунтовими водами, проникнення солоної води, моніторинг поверхневих вод, водосховищ та озер, моніторинг естуаріїв, захист водозборів та джерел води, моніторинг пляжів, стік зливових вод, моніторинг NPS, скидання NPDES, вхідні та вихідні стічні води, вертикальне профілювання, технологічну воду та аквакультуру.

Датчик HI98195 Multiparameter Water Quality Meter ідеально підходить для польових досліджень завдяки своїй водонепроникній конструкції та широкому діапазону вимірювань. Датчик Apure KPS-400 Multiparameter Water Quality Sensor призначений для промислового використання, цей датчик забезпечує точні вимірювання в реальному часі та підтримує різноманітні параметри якості води. Датчик Yosemitech Y4001 Handheld Multiparameter Water Quality Meter, завдяки бездротовому підключенню та можливості вимірювання до п'яти параметрів одночасно, є зручним для мобільного використання. Датчик Manta 2 Multiparameter Water Quality Sonde забезпечує професійний моніторинг, високоточні вимірювання та підходить для довгострокового моніторингу водних ресурсів. Вибір конкретної моделі залежить від потреб, умов експлуатації та бюджету.

Враховуючи проведений порівняльний аналіз, для реалізації нашої кіберфізичної системи використовуватимемо *датчик Yosemitech Y4001 Handheld Multiparameter Water Quality Meter* (рис. 2.4), який є зручним для мобільного використання, має бездротове підключення та забезпечує можливість вимірювання до п'яти параметрів одночасно.



Рис. 2.4 – Датчик Yosemitech Y4001 Handheld Multiparameter Water Quality Meter для визначення хімічного складу води

Датчики для вимірювання швидкості потоку води є важливим інструментом для моніторингу водних ресурсів, особливо в річках, каналах, водосховищах та інших водних системах. Вони дозволяють точно визначити швидкість руху води, що є важливим для оцінки її здатності до транспортування речовин, аналізу екосистем та управління водними ресурсами.

Існують різні типи датчиків для вимірювання швидкості потоку води, кожен з яких має свої особливості та переваги. Основні типи включають:

1. Акустичні датчики (Doppler-ефект). Ці датчики використовують звукові хвилі для вимірювання швидкості частинок води. Зміна частоти звуку, що відбивається від частинок води, дозволяє визначити швидкість потоку. Вони підходять для вимірювань на великих глибинах і мають високу точність.

2. Електромагнітні датчики. Використовують принцип індукції для вимірювання швидкості води. Коли вода рухається через магнітне поле, індукується електричний струм, який пропорційний швидкості потоку. Ці датчики дуже точні і широко використовуються в промислових та екологічних моніторингах.

3. Механічні датчики (мехатронні). Вони використовують обертові лопаті або турбіни, які реагують на потік води. Коли вода рухається, лопаті обертаються, і їх обертова швидкість використовується для розрахунку швидкості потоку.

4. Радіоактивні та лазерні датчики. Ці технології використовують радіацію або лазерні промені для відслідковування швидкості руху води. Вони дозволяють вимірювати швидкість потоку на дуже малих відстанях та у спеціальних умовах.

Залежно від застосування та специфіки середовища, вибір датчика визначається його точністю, умовами експлуатації, вартістю та можливістю інтеграції з іншими системами моніторингу.

Порівняльний аналіз датчиків для вимірювання швидкості потоку води представлений в Таблиці 2.4, яка дає змогу порівняти основні характеристики різних моделей датчиків, включаючи тип вимірювання, діапазон вимірювання, точність, особливості та ціну. Вибір моделі залежить від специфіки вашої задачі, доступного бюджету та необхідних функцій..

Таблиця 2.4 – Порівняльний аналіз датчиків для вимірювання швидкості потоку води

Модель	Тип	Діапазон	Точність	Особливості	Застосування	Ціна, USD
SonTek Argonaut- S	Акустичний доплер	0,1 - 10 м/с	±1%	Порта- тивний, дані в режимі реального часу, занурюва- льний	Річки, струмки, моніторинг узбережжя	6000
Aqua Qube 1000	Електромаг- нітний	0,02 - 3 м/с	±0,1 см/с	Бездротовий зв'язок, низьке енергоспо- живання, компактний	Струмки, річки, очищені води	2000
Teledyne ISCO 4150	Електромаг- нітний	0,05 - 2 м/с	±0,5%	Дистанцій- ний моніторинг, міцна конструкція	Річки, очищені стічні води	4500
OTT Hydromet WS 350	Акустичний доплер	0,1 - 5 м/с	±2%	Дані в режимі реального часу, з підтримкою GPS	Річки, струмки, водосховища	8000

Кінець таблиці 2.4

RDI Stream Pro Acoustic D	Акустичний доплер	0,02 - 10 м/с	±1%	Висока роздільна здатність, вимірюван- ня на великих відстанях	Річки, струмки, моніторинг навколиш- нього середовища	9999
---------------------------------------	----------------------	------------------	-----	--	--	------

Враховуючи проведений порівняльний аналіз, для реалізації нашої кіберфізичної системи використовуватимемо датчик *AquaQube 1000* для вимірювання швидкості потоку води. AquaQube 1000 – це електромагнітний датчик потоку, призначений для вимірювання витрати води в різних сферах застосування. Зазвичай такі датчики мають компактну і міцну конструкцію, часто мають циліндричний корпус з електричними роз'ємами для інтеграції в системи моніторингу. Вони спроектовані таким чином, щоб витримувати зовнішні умови і забезпечувати точні вимірювання витрати.

Датчики наявності домішок у воді використовуються для вимірювання концентрації різних забруднювачів у воді, таких як хімічні сполуки, важкі метали, органічні речовини, пестициди, а також для виявлення мікробіологічних забруднювачів. Вони є важливим інструментом для моніторингу якості води та забезпечення її безпеки для споживання.

За принципом роботи розрізняють:

1. Оптичні датчики – використовують принцип зміни світла при проходженні через воду, що містить забруднювачі. Зміни в поглинанні або розсіянні світла можуть вказувати на присутність домішок.

2. Електрохімічні датчики – вимірюють зміни електричних властивостей води, такі як зміни в потенціалі, опір або струм, які викликаються наявністю забруднювачів.

3. Іонні датчики – виявляють присутність іонів певних забруднювачів, таких як важкі метали або кислотні/лужні сполуки.

Типи забруднювачів, які визначаються такими датчиками: хімічні домішки (нитрати, фосфати, пестициди, важкі метали (свинець, кадмій, ртуть)), мікробіологічні домішки (бактерії, віруси, водорості), органічні забруднювачі (полімери, ароматичні сполуки, токсичні речовини).

Датчики наявності домішок у воді є критично важливими для захисту екосистем і здоров'я людини. Їх застосування дозволяє оперативно виявляти забруднення та реагувати на екологічні загрози.

Порівняльний аналіз датчиків наявності домішок у воді представлений у Таблиці 2.5.

Таблиця 2.5 – Порівняльний аналіз датчиків наявності домішок у воді

Модель	Тип	Принцип	Застосування	Переваги	Недоліки
Horiba U-50	Мульти-параметровий	Електрохімічний, оптичний	Лабораторії, польові умови	Універсальність, точність, зручність	Висока ціна, потребує калібрування
YSI ProDSS	Мульти-параметровий	Електрохімічний, оптичний	Польові дослідження	Велика кількість параметрів, автоматичне калібрування	Висока ціна, складне налаштування
Aqua TROLL 500	Мульти-параметровий	Електрохімічний	Довгостроковий моніторинг	Міцний, зручний для польових умов	Потрібно калібрування для точності

Кінець таблиці 2.5

SenTec 490	Моно- параметровий	Електрохіміч- ний	Аквакультура, рибні господарства	Висока точність для кисню, швидке реагування	Обмеже- ння на інші параме- три
Hach 2100Q	Моно- параметровий	Оптичний	Контроль питної води	Портатив- ність, простота використання	Обмежені можли- вості

Датчики Horiba U-50 та YSI ProDSS є дуже потужними універсальними датчиками для багатьох параметрів, але їхня висока ціна може бути обмеженням для деяких користувачів. Датчик Aqua TROLL 500 також є дуже практичним для польових умов, з акцентом на довгостроковий моніторинг води. Датчики SenTec 490 і Hach 2100Q є більш спеціалізованими і обмеженими у функціональності, але добре підходять для окремих вимірювань. Вибір залежить від конкретних потреб (тип забруднювачів, точність, умови використання) і бюджету.

Враховуючи проведений порівняльний аналіз, для реалізації нашої кіберфізичної системи використовуватимемо датчик Aqua TROLL 500 (рис. 2.5) для визначення наявності домішок у воді. Багатопараметричний зонд Aqua TROLL 500 – це бездротовий багатозондовий зонд, який спрощує збір даних, одночасно зменшуючи кількість годин, необхідних для польових робіт. Має автоматичне налаштування та швидку реакцію, що пришвидшує відбір проб, а автоматизований збір даних усуває необхідність запису даних у польові журнали.

Гнучкий багатозондовий датчик підходить для вибіркового перевірок та відбору проб з низьким потоком, а також для довгострокового використання. Протиобростаючий склоочисник та титановий корозійностійкий корпус допомагають захистити якість даних у складних умовах.



Рис. 2.5 – Датчик Aqua TROLL 500 для визначення наявності домішок у воді

Нижній рівень кіберфізичної системи моніторингу водних ресурсів є основою всієї архітектури та складається з інтегрованої мережі сенсорів, які встановлюються безпосередньо у водоймах або трубопроводах.

Формування нижнього рівня кіберфізичної системи моніторингу водних ресурсів полягає у виборі датчиків збору даних, здатних у реальному часі вимірювати фізико-хімічні параметри води. Ці сенсори забезпечують безперервний збір точних даних, які передаються на вищі рівні системи для обробки, аналізу та прийняття рішень.

Ефективне функціонування нижнього рівня є критичним для достовірності даних і, відповідно, для якості моніторингу та управління водними ресурсами. Правильний вибір типу сенсорів, точок встановлення та стабільності передачі даних визначає надійність усієї кіберфізичної системи.

## 2.2 Середній рівень кіберфізичної системи моніторингу водних ресурсів

Формування середнього рівня кіберфізичної системи моніторингу водних ресурсів зосереджується на забезпеченні надійної передачі, агрегації та первинної обробки даних, зібраних на нижньому (сенсорному) рівні. Цей рівень виступає посередником між фізичними сенсорами та обчислювальними сервісами верхнього рівня.

Основні функції середнього рівня:

1. Комунікація – забезпечує двосторонній зв'язок між сенсорами і сервером/хмарою, підтримує різні технології бездротового та дротового зв'язку (LoRaWAN, NB-IoT, 4G/5G, Wi-Fi, Ethernet).

2. Збір і буферизація даних – проміжне зберігання даних (локально на шлюзах) у випадку відсутності мережі, фільтрація, усереднення, видалення шуму або аномалій.

3. Шлюзи (gateways) – перетворення протоколів передачі (наприклад, з Modbus до MQTT), з'єднання з зовнішніми платформами або базами даних, інтеграція з системами захисту даних (автентифікація, шифрування).

4. Протоколи та стандарти – використання промислових стандартів: MQTT, CoAP, HTTP/HTTPS, OPC UA, підтримка IoT-платформ (Azure IoT, AWS IoT Core, ThingsBoard тощо).

Середній рівень кіберфізичної системи моніторингу водних ресурсів є критичним для забезпечення безперебійного, захищеного та ефективного транспортування даних від сенсорів до аналітичних систем. Його правильне проектування гарантує масштабованість, відмовостійкість та оперативність прийняття рішень у реальному часі.

Для формування середнього рівня кіберфізичної системи моніторингу водних ресурсів використовуватимемо *контролер Raspberry Pi* – одноплатний комп'ютер, який ідеально підходить для задач збору, обробки та передачі даних із сенсорів завдяки своїй гнучкості, компактності та можливості підключення до мереж.

Контролер Raspberry Pi (рис. 2.6) є ефективним, гнучким і недорогим рішенням для реалізації середнього рівня кіберфізичної системи моніторингу водних ресурсів. Його можна швидко інтегрувати в пілотні або маломасштабні проекти, з подальшою можливістю масштабування.

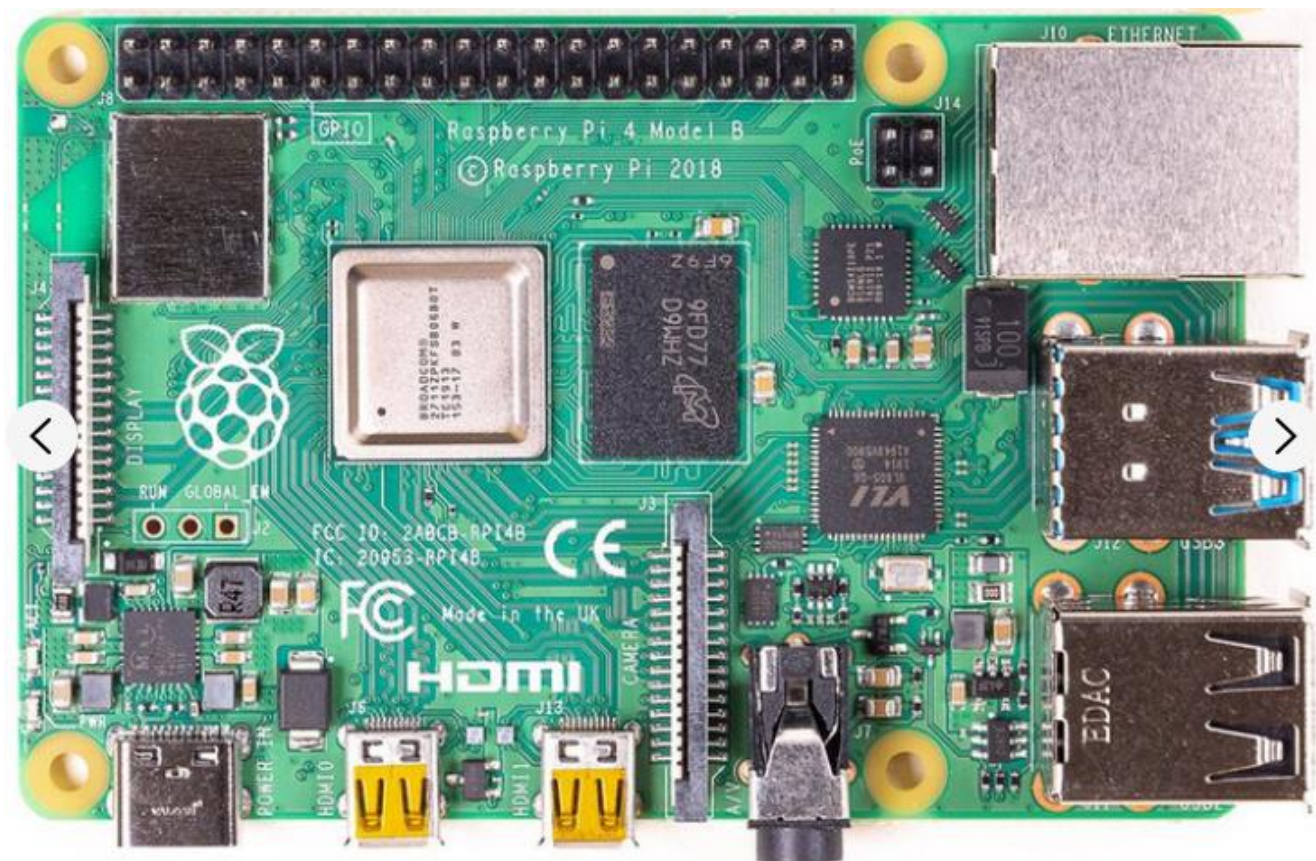


Рис. 2.6 – Контролер Raspberry Pi

Функції Raspberry Pi у середньому рівні кіберфізичної системи моніторингу:

1. Збір даних – підключення до сенсорів напряму через GPIO або через UART/I2C/SPI, збір інформації з багатьох датчиків одночасно;
2. Локальна обробка – виконання програм фільтрації, попереднього аналізу, виявлення аномалій, збереження даних у базі (наприклад, SQLite або InfluxDB).
3. Комунікація – передача даних у хмару або на сервер через MQTT, HTTP, FTP, WebSocket, підтримка бездротових протоколів (Wi-Fi, 4G через модем).

4. Інтеграція з іншими пристроями – підключення камер, дисплеїв, SD-карт, модулів LoRa або NB-IoT, можливість відображення локальної візуалізації через веб-інтерфейс.

5. Автоматизація – реалізація правил, наприклад: якщо рівень рН > 9 – надіслати сигнал тривоги, розширення через Node-RED або Python-скрипти.

Перевагами Raspberry Pi є: дешевизна та доступність, широка спільнота розробників, гнучкість у підключенні датчиків і мереж, легкість програмування (Python, C++, Node.js).

Обмеження Raspberry Pi: не призначений для екстремальних умов (пил, волога, високі температури), обмежена обчислювальна потужність у порівнянні з промисловими контролерами, потребує захисту корпусом у польових умовах.

Raspberry Pi є ефективним, гнучким і недорогим рішенням для реалізації середнього рівня кіберфізичної системи моніторингу водних ресурсів. Його можна швидко інтегрувати в пілотні або маломасштабні проекти, з подальшою можливістю масштабування.

Raspberry Pi – це одноплатний мікрокомп'ютер, який часто використовується як контролер у системах моніторингу завдяки своїй універсальності, малій вартості та компактності. Його можна застосовувати як проміжну ланку між сенсорами та обчислювальними або хмарними сервісами. Контролер здатен одночасно отримувати дані з кількох сенсорів, виконувати їх попередню обробку, зберігати локально або передавати далі через інтернет за допомогою Wi-Fi, Ethernet або мобільного зв'язку. Raspberry Pi підтримує роботу з багатьма протоколами та стандартами зв'язку, легко програмується (особливо мовою Python) і дозволяє реалізовувати як прості функції збору даних, так і складні алгоритми аналізу чи виявлення аномалій. Завдяки доступу до цифрових та аналогових входів/виходів, він може безпосередньо взаємодіяти з різноманітними сенсорами, а також працювати з зовнішніми пристроями, такими як модулі зв'язку або камери. Raspberry Pi не призначений для роботи в жорстких умовах без додаткового захисту, однак його активно використовують у дослідницьких проектах, пілотних системах моніторингу та освітніх цілях.

Крім своєї апаратної гнучкості, Raspberry Pi має розвинене програмне середовище, що дозволяє розробляти та запускати повноцінні додатки на базі операційних систем Linux, зокрема Raspberry Pi OS. Це відкриває можливості для інтеграції з базами даних, веб-сервісами, візуалізаційними платформами, а також для розгортання локальних веб-інтерфейсів керування системою моніторингу. У випадку з водними ресурсами контролер може бути запрограмований на регулярний збір показників якості води, збереження історії вимірювань, передачу даних у хмару або на сервер, а також автоматичне надсилання сповіщень у разі перевищення допустимих значень.

Його обчислювальні можливості дозволяють реалізовувати елементи штучного інтелекту або машинного навчання безпосередньо на пристрої, наприклад, для прогнозування рівня забруднення. Завдяки великій спільноті користувачів Raspberry Pi, існує широкий спектр бібліотек, готових рішень і документації, що значно полегшує розробку і впровадження проєктів. Таким чином, Raspberry Pi є ефективною основою для створення інтелектуального вузла кіберфізичної системи, який виконує функції зв'язку, аналізу, прийняття рішень і взаємодії з іншими рівнями інфраструктури моніторингу водних ресурсів.

У практичному застосуванні Raspberry Pi може виступати як центральний елемент локального вузла системи моніторингу. Наприклад, у віддалених ділянках річок або водойм він може керувати мережею сенсорів, збираючи дані про температуру, рН, електропровідність, концентрацію розчинених домішок, а також метеорологічні показники, якщо це потрібно для аналізу. У таких умовах Raspberry Pi часто поєднується з сонячною панеллю, контролером заряду й акумулятором, що дозволяє забезпечити автономну та безперебійну роботу впродовж тривалого часу.

Крім збору даних, Raspberry Pi може виступати в ролі мікросервера, що забезпечує локальний доступ до системи через веб-інтерфейс або мобільний додаток. Це особливо зручно для технічного обслуговування або для локальних екологічних служб. Контролер також може реалізовувати первинне прийняття рішень – наприклад, вмикати насос, відкривати або закривати клапан, запускати

сигнал тривоги або активувати GSM-модем для надсилання повідомлення у разі небезпечного рівня забруднення.

У системах більших масштабів кілька Raspberry Pi можуть працювати у зв'язці, передаючи дані на центральний сервер або до хмарної платформи, де виконується їх централізована обробка. Такий підхід підвищує гнучкість і масштабованість системи, дозволяючи оперативно розширювати мережу спостереження без значних витрат на дорогі промислові контролери.

Завдяки поєднанню функціональності, низької вартості, підтримки сучасних технологій зв'язку та широких можливостей програмування, Raspberry Pi є надзвичайно ефективним компонентом для середнього рівня кіберфізичних систем моніторингу водних ресурсів – особливо у випадках, коли потрібна гнучкість, автономність та економічна доцільність.

Важливим аспектом використання Raspberry Pi як контролера середнього рівня є його здатність до інтеграції з хмарними сервісами, такими як AWS IoT, Google Cloud IoT або відкритими платформами на кшталт ThingsBoard чи Node-RED. Це дозволяє не лише передавати дані у режимі реального часу, але й створювати повноцінні аналітичні та візуалізаційні рішення, керовані дистанційно. Дані з Raspberry Pi можуть автоматично надходити у хмару, де вони аналізуються, архівуються та представляються у вигляді графіків, карт чи звітів для користувачів, операторів або екологічних служб.

Raspberry Pi також дає змогу реалізувати кібербезпеку на базовому рівні – шляхом налаштування захищених каналів зв'язку (наприклад, MQTT over TLS), обмеження доступу через SSH, застосування фаєрволів та аутентифікації користувачів. У контексті захисту водних ресурсів, де дані можуть мати стратегічне значення, ці можливості є особливо важливими.

Завдяки розвиненій екосистемі аксесуарів Raspberry Pi можна легко доповнити функціональністю, що виходить за межі стандартного моніторингу. Наприклад, підключення камери дозволяє проводити відеоспостереження за станом водойми або обладнання, а GPS-модуль – здійснювати геоприв'язку даних, що особливо корисно в мобільних або плаваючих платформах. Через інтеграцію з

датчиками рівня води, швидкості течії чи гідрологічними буями, Raspberry Pi може бути частиною комплексного моніторингового рішення, здатного аналізувати не лише якість, а й динаміку водних ресурсів.

Загалом, завдяки високій функціональній гнучкості, доступності й підтримці сучасних технологій, Raspberry Pi перетворюється з простого контролера на повноцінний «розумний вузол» у складі кіберфізичної системи. Він забезпечує зв'язок між фізичним середовищем та цифровою інфраструктурою, сприяючи формуванню інтелектуального управління водними ресурсами – як на локальному рівні, так і в рамках регіональних або національних моніторингових систем.

Вибір стандарту передачі даних залежить від: типу датчиків (цифрові, аналогові, інтелектуальні), відстані до датчиків, потреб у швидкості обміну та стабільності зв'язку, енергоспоживання та умов розміщення.

Оскільки для більшості обраних раніше датчиків якості води рекомендовано використовувати Wi-Fi або Bluetooth, залежно від підтримки самим датчиком, то у проєктованій кіберфізичній системі моніторингу водних ресурсів оберемо *стандарту передачі даних Wi-Fi та Bluetooth*. Wi-Fi є стандартом бездротової передачі даних, який використовується для підключення пристроїв до комп'ютерних мереж або Інтернету. Wi-Fi може бути використаний для передачі даних на великі відстані в межах локальної мережі або підключення до Інтернету через маршрутизатор. Bluetooth – це стандарт бездротової передачі даних для коротких відстаней. Він регулюється стандартом IEEE 802.15.1. Bluetooth зазвичай використовується для підключення пристроїв на короткій відстані.

Wi-Fi має більший радіус дії, до 100 м у відкритому просторі (залежно від стандарту), у той час як Bluetooth – до 100 м для Bluetooth 5.0 і менше для попередніх версій. Wi-Fi забезпечує більшу швидкість передачі даних (до 9.6 Гбіт/с для Wi-Fi 6), тоді як Bluetooth зазвичай має швидкість до 3 Мбіт/с (для Bluetooth 4.0). Bluetooth, зокрема Bluetooth Low Energy (BLE), споживає значно менше енергії, що робить його ідеальним для використання в мобільних пристроях і датчиках, які потребують тривалої автономної роботи.

### 2.3 Висновки

Отже, в розділі виконано вибір датчиків для формування нижнього рівня кіберфізичної системи моніторингу водних ресурсів. Для формування нижнього рівня кіберфізичної системи моніторингу водних ресурсів використовуватимемо *датчик Risinglink Smart Monitor* для вимірювання рівня води, який має гарне співвідношення ціни та діапазону вимірювань, автономне живлення та комунікацію через поширений протокол Wi-Fi, а також є рішенням з мобільним сповіщенням, що є дуже зручним для реалізації кіберфізичної системи; *датчик HOVO MX2201* для вимірювання температури води; *датчик PASCO Wireless pH Sensor (PS-3204)* для вимірювання кислотно-лужного балансу (pH) води, який має низьку ціну та бездротове з'єднання через Bluetooth, що забезпечує зручність у використанні та передачі даних; *датчик Yosemitech Y4001 Handheld Multiparameter Water Quality Meter* для визначення хімічного складу води, який є зручним для мобільного використання, має бездротове підключення та забезпечує можливість вимірювання до п'яти параметрів одночасно; *датчик AquaQube 1000* для вимірювання швидкості потоку води; *датчик Aqua TROLL 500* для визначення наявності домішок у воді.

Крім цього, в розділі виконано вибір контролера для формування середнього рівня кіберфізичної системи моніторингу водних ресурсів. Для формування середнього рівня кіберфізичної системи моніторингу водних ресурсів використовуватимемо *контролер Raspberry Pi* – одноплатний комп'ютер, який ідеально підходить для задач збору, обробки та передачі даних із сенсорів завдяки своїй гнучкості, компактності та можливості підключення до мереж.

Також у розділі виконано вибір стандартів для передачі даних між компонентами кіберфізичної моніторингу водних ресурсів. Оскільки для більшості обраних раніше датчиків якості води рекомендовано використовувати Wi-Fi або Bluetooth, залежно від підтримки самим датчиком, то у проєктованій кіберфізичній системі моніторингу водних ресурсів оберемо *стандарти передачі даних Wi-Fi та Bluetooth*.

### **3 МЕТОД ТА АЛГОРИТМ ДІЯЛЬНОСТІ КІБЕРФІЗИЧНОЇ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ ВОДНИХ РЕСУРСІВ**

#### **3.1 Метод діяльності кіберфізичної системи моніторингу водних ресурсів**

Діяльність кіберфізичної системи моніторингу водних ресурсів полягає в інтеграції фізичних елементів, таких як сенсори, з інформаційними технологіями для постійного збору, обробки, аналізу та передачі даних щодо стану водних ресурсів. Основна мета такої системи – забезпечити ефективний моніторинг якості води, рівня забруднення, змін кліматичних умов і надання своєчасних даних для ухвалення рішень щодо управління водними ресурсами.

Основні етапи діяльності кіберфізичної системи моніторингу водних ресурсів:

1. Збір даних (сенсори та пристрої збору) – кіберфізична система починає свою діяльність із моніторингу фізичних параметрів води. Для цього використовуються різноманітні обрані у 2 розділі датчики: Risinglink Smart Monitor для вимірювання рівня води, HOB0 MX2201 для вимірювання температури води, PASC0 Wireless pH Sensor (PS-3204) для вимірювання кислотно-лужного балансу (pH) води, Yosemitech Y4001 Handheld Multiparameter Water Quality Meter для визначення хімічного складу води, AquaQube 1000 для вимірювання швидкості потоку води, Aqua TROLL 500 для визначення наявності домішок у воді тощо. Датчики можуть бути встановлені як на постійних станціях, так і на мобільних платформах (наприклад, безпілотниках або плавучих пристроях).

2. Обробка даних (контролери та алгоритми) – зібрані дані передаються на контролер Raspberry Pi. Тут вони можуть зазнавати попередньої обробки: фільтрація шуму в даних, перетворення сигналів з аналогових датчиків в цифрові, локальне збереження даних у разі відсутності зв'язку або для подальшого аналізу. Контролери можуть використовувати прості алгоритми для первинного аналізу даних, наприклад, виявлення аномалій або перевищення порогових значень для певних параметрів (наприклад, високий рівень забруднення).

3. Передача даних (мережі та зв'язок) – після обробки дані можуть бути передані на центральний сервер або в хмару для подальшого зберігання та аналізу. Для цього будуть використовуватися різні типи зв'язку: Wi-Fi – для передачі даних в межах локальних мереж та Bluetooth – для передачі даних на короткі відстані, наприклад, від сенсорів до контролера.

4. Аналіз та візуалізація (хмарні сервіси, локальні сервери) – дані, передані на сервер або в хмару, можуть оброблятися за допомогою складніших алгоритмів аналізу: прогнозування (наприклад, прогноз зміни рівня води або забруднення), аналіз тенденцій (визначення довгострокових змін у стані водних ресурсів), виявлення аномалій (наприклад, раптове забруднення або зміна рН, що може сигналізувати про аварійну ситуацію). Дані можуть бути візуалізовані у вигляді графіків, карт, інтерфейсів для моніторингу в реальному часі або звітів для органів управління водними ресурсами.

5. Виконання дій (автономне або централізоване управління) – за результатами аналізу може бути автоматично запущена реакція системи: автономні дії (наприклад, система може вмикати насос для очищення води, якщо рівень забруднення перевищує певний поріг), сповіщення (система може надсилати повідомлення або тривогу операторам або екологічним службам для вжиття негайних заходів), керування ресурсами (на основі зібраних і оброблених даних органи водного господарства можуть коригувати використання водних ресурсів, визначати запаси води або шукати шляхи для зменшення забруднення).

6. Зворотній зв'язок і оптимізація – кіберфізична система постійно покращується завдяки зворотному зв'язку. Дані, отримані після виконання певних дій (наприклад, очищення води), можуть бути використані для подальшого вдосконалення алгоритмів, коригування сенсорів або налаштувань системи. Крім того, система може збирати історичні дані для створення більш точних моделей, прогнозів і сценаріїв, що дозволяє проводити довгостроковий моніторинг і оцінку стану водних ресурсів.

Кіберфізична система моніторингу водних ресурсів діє як інтегроване середовище, яке збирає і аналізує дані від сенсорів, передає ці дані для аналізу та

ухвалення рішень, а також автоматизує дії для підтримки сталого стану водних ресурсів. Завдяки інтеграції реальних даних з інформаційними технологіями, такі системи допомагають своєчасно виявляти проблеми з водними ресурсами та мінімізувати ризики для екосистем і населення.

*Метод діяльності кіберфізичної системи моніторингу водних ресурсів складається з таких кроків:*

1) вибір параметрів моніторингу водних ресурсів: рівень води ( $wl$ ), температура ( $wt$ ), кислотно-лужний баланс ( $wph$ ), хімічний склад ( $wcc$ ), швидкість потоку ( $wfr$ ), наявність домішок ( $ipw$ ) тощо;

2) формування множини нормальних значень параметрів моніторингу водних ресурсів (з врахуванням місця моніторингу водних ресурсів): рівень води ( $nwl$ ), температура ( $nwt$ ), кислотно-лужний баланс ( $nwph$ ), хімічний склад ( $nwcc$ ), швидкість потоку ( $nwfr$ ), наявність домішок ( $nipw$ ) тощо:  $NWMP = \{nwmp_1, nwmp_2, \dots, nwmp_6\} = \{nwl, nwt, nwph, nwcc, nwfr, nipw\}$ , по перевищенню яких відбувається, наприклад, генерація автоматизованих рішень (запуск очисних систем, регулювання подачі води тощо) та сповіщення операторів;

3) підбір та встановлення сенсорної мережі у стратегічних точках, де необхідно організувати моніторинг води, – підбір датчиків та IoT -пристроїв для вимірювання рівня води, температури, кислотно-лужного балансу, хімічного складу води, швидкості потоку, наявності домішок у воді тощо для безперервного збору даних із водойм, річок, озер, ґрунтових вод;

4) збір даних з встановлених датчиків, підключених у мережу Інтернету речей, та формування множини  $WMP = \{wmp_1, wmp_2, \dots, wmp_6\} = \{wl, wt, wph, wcc, wfr, ipw\}$  в певний момент часу;

*кібернетичний рівень (обробка та передача даних):*

5) використання бездротових мереж (Bluetooth, Wi-Fi тощо) для передачі інформації у хмару або локальний центр обробки із забезпеченням безпеки та цілісності даних під час передавання;

6) збір інформації на хмарних серверах або локальних обчислювальних вузлах;

7) попередня фільтрація та агрегація даних;

8) візуалізація даних у реальному часі через цифрові панелі;

*аналітичний та управлінський рівні (обробка даних та прийняття рішень):*

9) аналіз отриманих даних в реальному часі з метою виявлення відхилень, аномалій, прогнозування змін, моделювання сценаріїв впливу різних факторів на стан водних ресурсів, виявлення потенційних загроз в рамках забезпечення моніторингу водних ресурсів:

9.1) якщо рівень води ( $wl$ ) суттєво вищий чи суттєво нижчий за норму ( $nwl$ ), то відбувається формування сигналів про небезпечні відхилення або порушення, сповіщення операторів, після якого відбувається генерація автоматизованих рішень (запуск очисних систем, регулювання подачі води тощо) або операторське реагування;

9.2) якщо температура ( $wt$ ) суттєво вища чи суттєво нижча за норму для даної пори року в даній місцевості ( $nwt$ ), то відбувається формування сигналів про небезпечні відхилення або порушення, сповіщення операторів, після якого відбувається генерація автоматизованих рішень (запуск очисних систем, регулювання подачі води тощо) або операторське реагування;

9.3) якщо кислотно-лужний баланс ( $wph$ ) суттєво вищий чи суттєво нижчий за норму ( $nwph$ ), то відбувається формування сигналів про небезпечні відхилення або порушення, сповіщення операторів, після якого відбувається генерація автоматизованих рішень (запуск очисних систем, регулювання подачі води тощо) або операторське реагування;

9.4) якщо хімічний склад води ( $wcc$ ) суттєво відрізняється від норми ( $nwcc$ ), то відбувається формування сигналів про небезпечні відхилення або порушення, сповіщення операторів, після якого відбувається генерація автоматизованих рішень (запуск очисних

систем, регулювання подачі води тощо) або операторське реагування;

9.5) якщо швидкість потоку ( $wfr$ ) суттєво вища чи суттєво нижча за норму ( $nwfr$ ), то відбувається формування сигналів про небезпечні відхилення або порушення, сповіщення операторів, після якого відбувається генерація автоматизованих рішень (запуск очисних систем, регулювання подачі води тощо) або операторське реагування;

9.6) якщо рівень наявності домішок ( $ipw$ ) суттєво вищий за норму ( $nipw$ ), то відбувається формування сигналів про небезпечні відхилення або порушення, сповіщення операторів, після якого відбувається генерація автоматизованих рішень (запуск очисних систем, регулювання подачі води тощо) або операторське реагування;

*звітність та візуалізація:*

10) довготривале зберігання інформації для аналізу трендів та прогнозування;

11) побудова графіків, карт, панелей управління;

12) генерація звітів для державних органів, екологічних інституцій, громадськості тощо із підтримкою стандартів прозорості та відкритості даних.

Розроблений метод діяльності кіберфізичної системи моніторингу водних ресурсів забезпечує кіберфізичну інтеграцію (поєднання фізичних (сенсори, об'єкти) та кібернетичних (аналітика, керування) компонентів), автономність (здатність функціонувати без постійного втручання людини), масштабованість (можливість розширення географії моніторингу), безперервність моніторингу (цілодобове спостереження в реальному часі).

Практичне значення та важливість методу діяльності кіберфізичної системи моніторингу водних ресурсів полягає в тому, що ця система дозволяє ефективно управляти водними ресурсами, забезпечуючи їх сталість, якість та доступність для різних потреб, від побутових до промислових. Впровадження такої кіберфізичної системи допомагає зменшити ризики екологічних катастроф, покращити

моніторинг забруднення, а також забезпечити ефективне управління водними ресурсами в умовах зміни клімату та урбанізації.

Кіберфізична система моніторингу водних ресурсів дозволяє завчасно виявляти потенційно небезпечні рівні забруднення води, таких як підвищення концентрації токсичних речовин, важких металів, пестицидів або навіть патогенних мікроорганізмів. Це дає змогу оперативно вжити заходів для попередження чи зменшення негативного впливу на екосистеми і здоров'я людини. Така здатність до раннього реагування допомагає уникнути екологічних катастроф та забруднення джерел питної води.

Завдяки постійному моніторингу фізичних та хімічних параметрів води, кіберфізична система допомагає органам управління водними ресурсами приймати обґрунтовані рішення щодо використання води в сільському господарстві, промисловості, водопостачанні та водовідведенні. Це дозволяє: оптимізувати використання води, зменшуючи витрати, і забезпечити її стале використання навіть у регіонах із обмеженими водними ресурсами; визначати якість води для різних потреб, коригуючи технологічні процеси, щоб уникнути погіршення якості питної води.

Кіберфізична система значно зменшує людський фактор у процесі моніторингу, дозволяючи автоматизувати багато етапів збору та обробки даних. Система може самостійно генерувати звіти, сповіщати про виявлені аномалії або порушення, а також ініціювати автоматичні дії (наприклад, вмикання насосів для очистки води або закриття клапанів). Це дозволяє знижувати витрати на ресурси та час, а також підвищує швидкість реагування на зміни в екологічній ситуації.

Кіберфізична система сприяє збереженню природних водних ресурсів шляхом своєчасного виявлення проблем та дозволяє проводити коригувальні заходи. Наприклад, система може виявити місця забруднення або неконтрольоване використання води, що дозволяє вжити заходів для зменшення шкідливого впливу на екосистеми. Це є важливим для підтримки біорізноманіття водних екосистем і збереження стабільності водного циклу.

Використання кіберфізичної системи дозволяє ефективно управляти ресурсами, знижуючи витрати на енергоспоживання, матеріали та обслуговування. В автоматизованій системі з мінімальним людським втручанням можна зменшити витрати на персонал, а також знизити фінансові витрати на реагування на аварії та забруднення, оскільки проблема виявляється на ранній стадії.

Кіберфізична система дозволяє об'єднувати дані з різних джерел – від сенсорів до зовнішніх екологічних даних, кліматичних прогнозів, даних від метеорологічних станцій тощо. Це дозволяє створювати інтегровані системи моніторингу, які можуть оцінювати складні взаємозв'язки між змінами в навколишньому середовищі та станом водних ресурсів. Такий підхід підвищує точність прогнозів та дозволяє планувати заходи в умовах змінного клімату.

Кіберфізична система може інтегруватися з публічними порталами, де люди можуть отримувати актуальні дані про стан водних ресурсів у реальному часі. Це підвищує прозорість і дозволяє громадськості брати активну участь у збереженні водних ресурсів. Окрім цього, органи влади, екологічні організації та науковці можуть працювати з одними й тими ж даними, що сприяє кращій координації дій.

Впровадження кіберфізичної системи допомагає забезпечити відповідність екологічним вимогам та міжнародним стандартам, таким як Європейські директиви з водних ресурсів або стандарти якості води. Система забезпечує можливість постійного контролю за виконанням екологічних нормативів, що важливо для організацій, які повинні звітувати перед державними органами або міжнародними організаціями.

Кіберфізичні системи моніторингу водних ресурсів мають надзвичайно важливе значення для сталого розвитку, ефективного управління водними ресурсами та захисту навколишнього середовища. Вони дозволяють забезпечити своєчасний доступ до даних, покращити оперативність реагування на проблеми та оптимізувати використання води, що в кінцевому підсумку сприяє збереженню водних екосистем і підвищенню якості життя. Відтак метод діяльності кіберфізичної системи моніторингу водних ресурсів є основою проектування та розроблення такої кіберфізичної системи.

### 3.2 Алгоритм діяльності кіберфізичної системи моніторингу водних ресурсів

Алгоритм діяльності кіберфізичної системи моніторингу водних ресурсів описує послідовність дій, які виконує система для збору, обробки, аналізу та реагування на інформацію про стан водного середовища. Цей алгоритм охоплює взаємодію фізичних компонентів (сенсорів, контролерів) з програмними модулями для забезпечення безперервного, автоматизованого моніторингу та управління.

Алгоритм діяльності кіберфізичної системи моніторингу водних ресурсів може включати такі кроки:

1. Ініціалізація системи – встановлення з'єднання між сенсорами, контролерами (наприклад, Raspberry Pi), комунікаційними модулями та сервером, перевірка працездатності обладнання та коректного зчитування параметрів.

2. Збір первинних даних – датчики вимірюють параметри води: температура, рН, електропровідність, рівень кисню, каламутність, наявність домішок тощо, дані збираються з заданою періодичністю (наприклад, щохвилини або щогодини).

3. Попередня обробка даних на локальному контролері – перевірка даних на наявність шумів або аномалій, усереднення значень, нормалізація одиниць виміру, зберігання тимчасових копій даних на локальному носії.

4. Передача даних до центрального сервера або хмари – використання стандартів зв'язку (Wi-Fi, Bluetooth тощо), шифрування або захист даних під час передавання (опційно), надсилання в реальному часі або з певною затримкою (залежно від режиму роботи).

5. Глибокий аналіз даних – застосування аналітичних алгоритмів або ШІ для: виявлення перевищення порогових значень, трендової аналітики (зміни в часі), прогнозування потенційних загроз або змін стану води.

6. Візуалізація результатів – відображення результатів на інформаційній панелі, побудова графіків, таблиць, інтерактивних карт, доступ до інформації для користувачів (операторів, екологів, громадськості).

7. Реагування на події – якщо виявлено критичне перевищення норм, то відбувається автоматична активація дій: надсилання SMS/електронних сповіщень, увімкнення насосів, фільтрів або перекриття клапанів, повідомлення відповідних служб (екологічна інспекція, управління водними ресурсами) тощо.

8. Адаптація системи – оновлення алгоритмів або порогових значень на основі зібраної статистики, самокалібрування датчиків або планове обслуговування, розширення мережі сенсорів при потребі.

9. Архівація та зберігання даних – збереження історичних даних у базі даних, підготовка звітів для аналізу довгострокових змін, експорт даних у формати, придатні для подальшої наукової обробки або використання державними структурами.

Алгоритм роботи кіберфізичної системи моніторингу водних ресурсів забезпечує автоматичне, безперервне та надійне спостереження за станом водного середовища, що дозволяє вчасно реагувати на небезпеки, приймати обґрунтовані управлінські рішення та забезпечити стале використання водних ресурсів.

Основними перевагами алгоритму діяльності кіберфізичної системи моніторингу водних ресурсів, які роблять його ефективним, масштабованим і придатним для практичного застосування в умовах сучасних викликів, є: безперервність та реальний час роботи, висока точність та достовірність, оперативність реагування, масштабованість та гнучкість, енергоефективність і економія ресурсів, можливість інтеграції з іншими інформаційними технологіями та системами, підтримка прийняття рішень, прозорість та відкритість тощо. Алгоритм діяльності кіберфізичної системи є інтелектуальним ядром цифрового екологічного моніторингу. Його переваги дозволяють досягти не тільки оперативного контролю якості води, але й довготривалого ефекту у формуванні екологічно безпечної інфраструктури, стійкої до ризиків і змін навколишнього середовища.

Блок-схема узагальненого алгоритму діяльності кіберфізичної системи моніторингу водних ресурсів представлена на рис. 3.1.

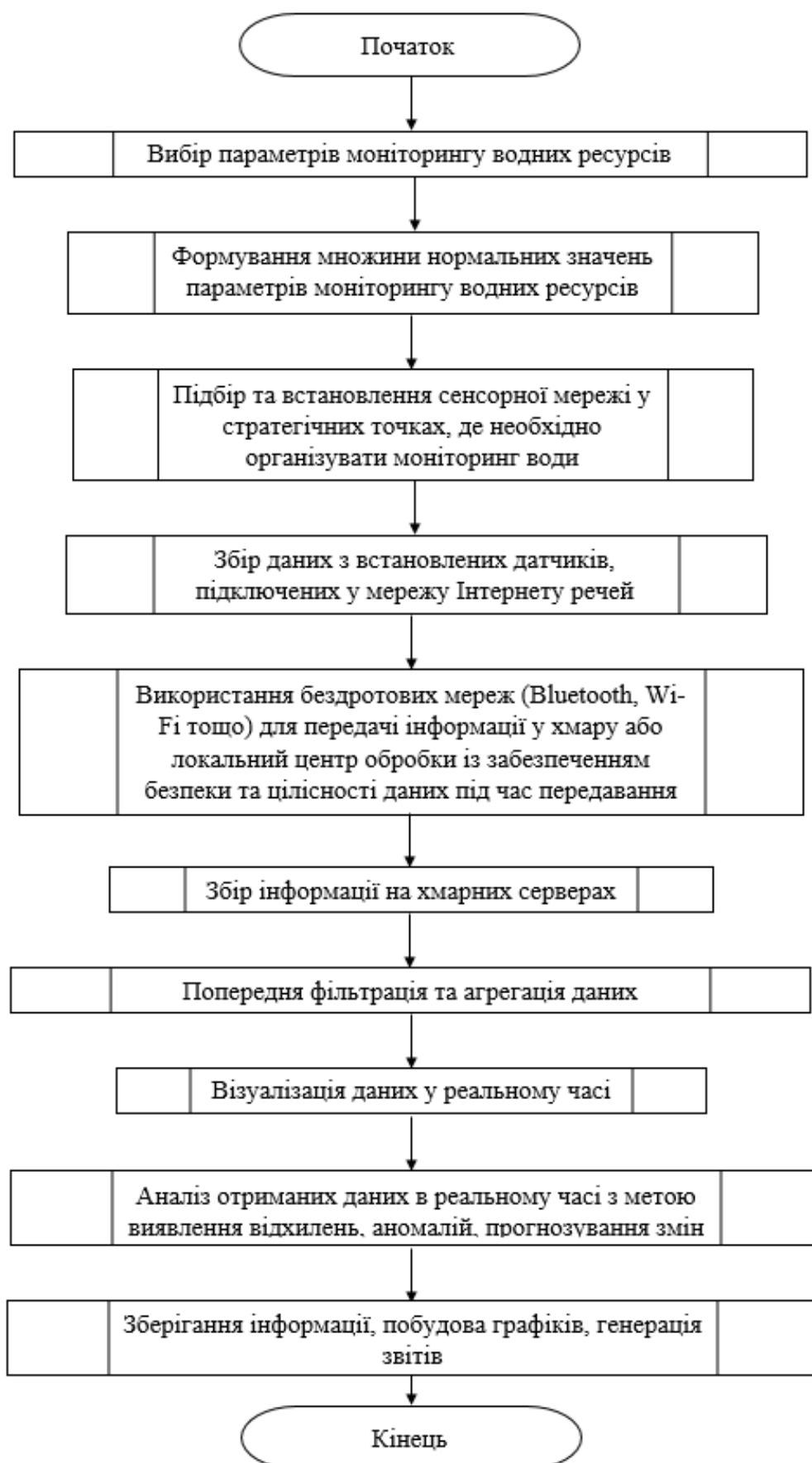


Рисунок 3.1 – Блок-схема узагальненого алгоритму діяльності кіберфізичної системи моніторингу водних ресурсів

### 3.3 Висновки

В розділі розроблений метод діяльності кіберфізичної системи моніторингу водних ресурсів, який забезпечує кіберфізичну інтеграцію (поєднання фізичних (сенсори, об'єкти) та кібернетичних (аналітика, керування) компонентів), автономність (здатність функціонувати без постійного втручання людини), масштабованість (можливість розширення географії моніторингу), безперервність моніторингу (цілодобове спостереження в реальному часі).

Практичне значення та важливість методу діяльності кіберфізичної системи моніторингу водних ресурсів полягає в тому, що ця система дозволяє ефективно управляти водними ресурсами, забезпечуючи їх сталість, якість та доступність для різних потреб, від побутових до промислових. Впровадження такої кіберфізичної системи допомагає зменшити ризики екологічних катастроф, покращити моніторинг забруднення, забезпечити ефективне управління водними ресурсами в умовах зміни клімату та урбанізації, завчасно виявляти потенційно небезпечні рівні забруднення води, таких як підвищення концентрації токсичних речовин, важких металів, пестицидів або навіть патогенних мікроорганізмів, оперативно вжити заходів для попередження чи зменшення негативного впливу на екосистеми і здоров'я людини, уникнути екологічних катастроф та забруднення джерел питної води, приймати обґрунтовані рішення щодо використання води в сільському господарстві, промисловості, водопостачанні та водовідведенні, визначати якість води для різних потреб, коригуючи технологічні процеси, щоб уникнути погіршення якості питної води, автоматизувати багато етапів збору та обробки даних, знижувати витрати на ресурси та час, а також підвищувати швидкість реагування на зміни в екологічній ситуації, ефективно управляти ресурсами, знижуючи витрати на енергоспоживання, матеріали та обслуговування, підвищує точність прогнозів та дозволяє планувати заходи в умовах змінного клімату, забезпечити відповідність екологічним вимогам та міжнародним стандартам, забезпечує можливість постійного контролю за виконанням екологічних нормативів.

Крім цього, в розділі розроблено також алгоритм діяльності кіберфізичної системи моніторингу водних ресурсів, який забезпечує автоматичне, безперервне та надійне спостереження за станом водного середовища, що дозволяє вчасно реагувати на небезпеки, приймати обґрунтовані управлінські рішення та забезпечити стаке використання водних ресурсів, є ефективним, масштабованим і придатним для практичного застосування в умовах сучасних викликів. Алгоритм діяльності кіберфізичної системи є інтелектуальним ядром цифрового екологічного моніторингу. Його переваги дозволяють досягти не тільки оперативного контролю якості води, але й довготривалого ефекту у формуванні екологічно безпечної інфраструктури, стійкої до ризиків і змін навколишнього середовища.

Алгоритм діяльності кіберфізичної системи моніторингу водних ресурсів забезпечує автоматизований, безперервний і високоточний контроль стану водного середовища в реальному часі. Завдяки поєднанню сенсорів, контролерів і аналітичних програмних рішень система оперативно виявляє відхилення, реагує на критичні події, формує прогнози та підтримує ухвалення рішень. Вона легко масштабується, економічно ефективна та сприяє прозорості екологічного моніторингу. Такий підхід є ключем до сталого управління водними ресурсами й запобігання екологічним ризикам.

## 4 КІБЕРФІЗИЧНА СИСТЕМА МОНІТОРИНГУ ВОДНИХ РЕСУРСІВ

### 4.1 Кіберфізична система моніторингу водних ресурсів

Кіберфізична система моніторингу водних ресурсів є інтегрованим технологічним середовищем, яке поєднує фізичні компоненти (сенсори, контролери, виконавчі пристрої) з цифровими (програмне забезпечення, алгоритми аналізу, передача даних) для забезпечення безперервного контролю якості води. Система функціонує в режимі реального часу, автоматично збираючи, обробляючи та аналізуючи інформацію про фізико-хімічні характеристики води, виявляючи відхилення від нормативів і передаючи результати до хмарних або локальних серверів. Її діяльність охоплює всі рівні – від зчитування параметрів середовища до прийняття рішень на основі алгоритмів штучного інтелекту або прогнозної аналітики. Така система дозволяє оперативно реагувати на екологічні загрози, оптимізувати використання водних ресурсів і підвищити ефективність управління водним середовищем, сприяючи його сталому розвитку та збереженню для майбутніх поколінь.

Основні компоненти кіберфізичної системи моніторингу водних ресурсів:

- 1) датчики Risinglink Smart Monitor для вимірювання рівня води;
- 2) датчики HOB0 MX2201 для вимірювання температури води;
- 3) датчики PASCO Wireless pH Sensor (PS-3204) для вимірювання кислотно-лужного балансу (pH) води;
- 4) датчики Yosemitech Y4001 Handheld Multiparameter Water Quality Meter для визначення хімічного складу води;
- 5) датчики AquaQube 1000 для вимірювання швидкості потоку води;
- 6) датчики Aqua TROLL 500 для визначення наявності домішок у воді;
- 7) контролер Raspberry Pi;
- 8) стандарти передачі даних Wi-Fi та Bluetooth.

Спроекуємо архітектуру кіберфізичної системи моніторингу водних ресурсів на основі розробленого методу діяльності – рис. 4.1.

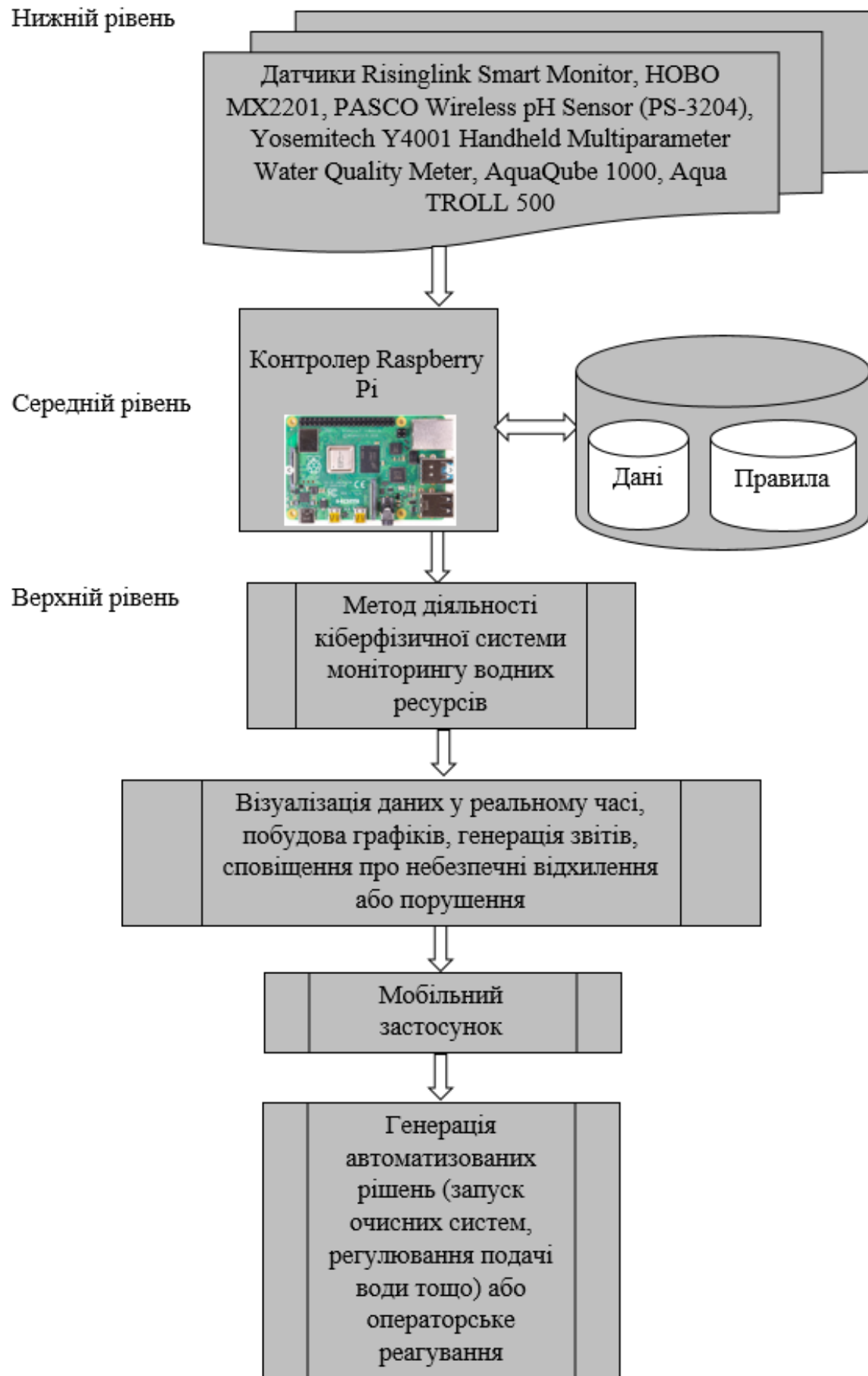


Рисунок 4.1 – Архітектура кіберфізичної системи моніторингу водних ресурсів

Ключовою особливістю кіберфізичної системи є здатність до адаптації та самоорганізації – вона може змінювати параметри моніторингу відповідно до зовнішніх умов, наприклад, під час паводків, посух або викидів забруднюючих речовин. Завдяки взаємодії між фізичними датчиками та обчислювальними модулями, система не лише фіксує наявний стан водного середовища, а й виявляє тенденції змін, що особливо важливо для довгострокового прогнозування екологічних ризиків. Передача даних здійснюється за допомогою бездротових технологій, таких як Wi-Fi, Bluetooth тощо, що забезпечує розгортання системи навіть у віддалених регіонах. Інформаційні потоки обробляються централізовано з можливістю подальшої візуалізації результатів на панелях управління, відкритих платформах або мобільних пристроях. У результаті така система стає ефективним інструментом для забезпечення екологічної безпеки, контролю за дотриманням санітарних норм, підтримки рішень у сфері водопостачання, аграрного планування, урбаністики та реагування на надзвичайні ситуації.

Метою кіберфізичної системи моніторингу водних ресурсів є забезпечення надійного, безперервного та автоматизованого контролю за якісними та кількісними показниками водного середовища з метою своєчасного виявлення відхилень, запобігання екологічним загрозам і підтримки прийняття ефективних управлінських рішень. Система спрямована на створення єдиного цифрового простору спостереження за водними ресурсами, що дозволяє підвищити екологічну безпеку, оптимізувати використання води, забезпечити сталий розвиток та доступ до актуальної інформації для зацікавлених сторін – державних установ, громадськості, науковців і підприємств.

Кіберфізична система моніторингу водних ресурсів має низку ключових переваг та широких можливостей, які роблять її ефективним інструментом для сучасного екологічного управління. Однією з головних переваг є автоматизація процесу моніторингу, що дозволяє здійснювати збір даних у режимі реального часу без постійної участі людини. Висока точність вимірювань, забезпечена сучасними сенсорами та алгоритмами фільтрації даних, сприяє підвищенню достовірності екологічної інформації. Система характеризується гнучкістю та масштабованістю

– вона може бути адаптована під різні типи водних об'єктів, розширена шляхом додавання нових сенсорів або модулів, інтегрована з іншими інформаційними платформами.

До можливостей системи належить виявлення забруднень та аномалій у водному середовищі, побудова трендів і прогнозів змін якості води, а також автоматичне реагування на критичні ситуації шляхом сповіщення або активації відповідних технічних заходів. Система дозволяє зберігати та аналізувати історичні дані, формувати звіти для державних і наукових структур, а також забезпечує прозорість і доступ до інформації для громадськості. В цілому, її використання підвищує ефективність екологічного нагляду, сприяє прийняттю обґрунтованих рішень і підтримує реалізацію стратегій сталого управління водними ресурсами.

Масштабування та подальший розвиток кіберфізичної системи моніторингу водних ресурсів є важливими чинниками для забезпечення її ефективного функціонування у широких географічних, екологічних та управлінських умовах. Масштабування передбачає розширення мережі сенсорів на більшу кількість водних об'єктів – від окремих річок і озер до цілих водозбірних басейнів або регіонів. При цьому можлива інтеграція нових типів сенсорів, які фіксують специфічні параметри (наприклад, мікропластик, нітрати, важкі метали), а також підключення мобільних або автономних платформ – безпілотних апаратів, плавучих станцій, супутникових даних.

У плані технологічного розвитку система може бути вдосконалена за рахунок впровадження штучного інтелекту та машинного навчання, що дозволить здійснювати інтелектуальний аналіз даних, автоматично виявляти закономірності та прогнозувати ризики. Також важливим напрямом є підвищення енергоефективності системи – зокрема, використання енергії сонця або вітру для живлення віддалених вузлів. На рівні інформаційної інфраструктури передбачається розвиток хмарних платформ, що забезпечать централізовану обробку, зберігання та доступ до даних для різних груп користувачів – від екологічних служб до громадських організацій.

Подальше вдосконалення системи також передбачає правову та інституційну інтеграцію – стандартизацію форматів даних, взаємодію з державними екосистемами моніторингу, а також залучення громадськості через сервіси відкритих даних. У результаті масштабована та динамічно розвинута система стає основою для створення цифрової моделі водного середовища, здатної забезпечити ефективне управління ресурсами в умовах кліматичних змін та зростаючого антропогенного навантаження.

#### 4.2 Приклади функціонування кіберфізичної системи моніторингу водних ресурсів

Розглянемо приклади функціонування кіберфізичної системи моніторингу водних ресурсів.

У центральній частині міста встановлено сенсорну мережу, що включає датчики Risinglink Smart Monitor, HOB0 MX2201 та PASCO Wireless pH Sensor. Система щогодини фіксує підвищення рівня домішок (*ipw*) та зміну рН (*wph*), що збігається з викидом стічних вод із промислової зони. Після фіксації відхилення від нормальних значень (*nipw* та *nwph*), Raspberry Pi передає дані через Wi-Fi на хмарний сервер, де формується тривожний сигнал. Автоматично надсилається сповіщення до муніципальної служби з рекомендаціями перевірити джерело забруднення та запустити локальні очисні фільтри.

У гірському районі, де можливі раптові паводки, датчики рівня води (Risinglink) та швидкості потоку (AquaQube 1000) встановлені в руслі річки. Система виявляє швидке зростання показників *wl* та *wfr*, що перевищує порогові значення (*nwl* та *nwfr*). Контролер Raspberry Pi негайно надсилає інформацію через Bluetooth до локального шлюзу, а далі в хмару. Дані візуалізуються на цифровій панелі у центрі моніторингу, активується попередження для місцевого населення та служб надзвичайних ситуацій.

У сільській громаді встановлена система для постійного контролю якості води зі свердловини. Датчики Aqua TROLL 500 і Yosemitech Y4001 вимірюють

домішки та хімічний склад. У разі виявлення підвищеного рівня нітратів, що перевищує  $nwsc$ , система автоматично генерує тривожний сигнал, що надходить до мобільного застосунку оператора. Запускається фільтраційна установка, а дані фіксуються в хмарному сховищі для подальшого аналізу.

У природному заповіднику встановлено малопотужну сенсорну мережу на сонячних батареях. Всі показники (рівень, температура, рН, хімічний склад, домішки) відслідковуються з використанням енергоефективного зв'язку (Wi-Fi/Bluetooth). Виявлення аномального підвищення температури води ( $w_t > nwt$ ) дозволяє спрогнозувати можливу загрозу для популяції риб. Дані автоматично передаються до екологічного центру, де формується науковий звіт і подається рекомендація щодо адаптації місцевої біоти до нових умов.

На території аграрного підприємства для поливу полів використовується вода з каналу. Система на базі датчиків HOBO MX2201, PASCО Wireless pH Sensor і Aqua TROLL 500 щодня фіксує температуру, рН та наявність домішок. Після підвищення температури ( $w_t > nwt$ ) у спекотний період і перевищення рівня домішок ( $ipw > nipw$ ), система автоматично повідомляє агронома через хмарний портал та пропонує регулювання графіка поливу, щоб уникнути пошкодження посівів. Дані зберігаються для аналізу продуктивності зрошення впродовж сезону.

У місті система моніторингу встановлена в резервуарах питної води та системах зворотного водопостачання. Raspberry Pi з'єднаний з мережею датчиків (Yosemitech Y4001, PASCО PS-3204) через Wi-Fi. У разі зміни хімічного складу води ( $wsc \neq nwsc$ ), що може вказувати на внутрішнє забруднення труб, система генерує попередження для служби водоканалу. Автоматично формується сигнал про потребу в очищенні фільтраційного обладнання, що мінімізує ризики для здоров'я населення.

Біля заводу встановлено сенсори Aqua TROLL 500 та Risinglink Smart Monitor для вимірювання рівня стоку та домішок. При виявленні перевищення норм ( $ipw > nipw$ ) система передає дані в хмару, де вони автоматично порівнюються з історичними записами. Якщо спостерігається негативна тенденція, формується звіт до екологічної інспекції з геоприв'язкою інциденту. Одночасно запускається

внутрішня процедура повторної очистки, передбачена системою менеджменту підприємства.

У прибережній зоні річки встановлено датчики для контролю температури води (HOBO MX2201), кислотно-лужного балансу (PASCO Wireless pH Sensor) та наявності домішок (Aqua TROLL 500). У розпал літнього сезону система фіксує зміну рН і зростання концентрації домішок після сильних дощів. Дані автоматично передаються в цифрову панель управління, а система формує повідомлення для місцевої адміністрації про необхідність тимчасово обмежити купання та посилити фільтрацію води. Завдяки своєчасному втручання вдається уникнути санітарних порушень і забезпечити безпеку відвідувачів.

Система моніторингу водних ресурсів інтегрована в платформу «розумного міста», яка об'єднує дані з різних джерел – від моніторингу повітря до систем водопостачання. Дані з Raspberry Pi передаються в об'єднаний міський центр аналітики, де поєднуються з показниками споживання води, метеоумовами та енергоспоживанням. Такий підхід дозволяє ефективно регулювати тиск у водопровідній мережі, оптимізувати споживання ресурсів і прогнозувати пікові навантаження. Наприклад, у період посухи система здатна автономно скорочувати обсяги зрошення парків без шкоди для зелених зон.

Такі приклади ілюструють високу адаптивність системи до різних середовищ та задач – від захисту природних екосистем до управління міською інфраструктурою, від забезпечення безпеки громадян і довкілля до підвищення ефективності міського управління.

Впровадження кіберфізичних систем моніторингу водних ресурсів має значний потенціал для підвищення ефективності управління водними ресурсами та покращення екологічного стану водних об'єктів. Така система дозволяє не лише оперативно збирати та передавати дані з численних сенсорів, але й здійснювати їх комплексний аналіз у реальному часі для виявлення відхилень від норми та автоматизованого реагування на різноманітні екологічні та техногенні загрози.

Однією з основних переваг є своєчасне виявлення потенційних небезпек, таких як забруднення води, зміни температури чи рівня води, що дозволяє

оперативно реагувати на порушення та запобігати значним екологічним катастрофам. Крім того, автоматизовані системи реагування, як-то запуск очисних установок або регулювання подачі води, зменшують необхідність в ручному втручанні, що знижує витрати та підвищує точність управлінських рішень.

Інтеграція таких систем у контексті «розумних міст» або сільськогосподарських підприємств дозволяє оптимізувати використання водних ресурсів, знижуючи їх витрати та підвищуючи ефективність зрошення чи водопостачання. Збирання даних на всіх етапах забезпечує можливість детального аналізу, що сприяє виявленню тенденцій, прогнозуванню змін та довготривалому плануванню з урахуванням екологічних факторів.

Універсальність та адаптивність такої системи, здатної працювати в різних умовах – від природних екосистем до урбанізованих зон, робить її важливим інструментом не лише для державного та муніципального управління, але й для навчання, наукових досліджень і навіть громадських ініціатив.

#### 4.3 Висновки

В розділі розроблено архітектуру кіберфізичної системи моніторингу водних ресурсів, яка є інтегрованим технологічним середовищем, що поєднує фізичні компоненти (датчики, контролери) з цифровими (програмне забезпечення, алгоритми аналізу, передача даних) для забезпечення безперервного контролю якості води. Система функціонує в режимі реального часу, автоматично збираючи, обробляючи та аналізуючи інформацію про фізико-хімічні характеристики води, виявляючи відхилення від нормативів і передаючи результати до хмарних або локальних серверів. Крім цього, в розділі представлено приклади роботи такої системи, які доводять, що впровадження кіберфізичних систем моніторингу водних ресурсів є важливим кроком до сталого розвитку, ефективного управління водними ресурсами та забезпечення безпеки навколишнього середовища на різних рівнях.

## ВИСНОВКИ

У роботі забезпечено автоматизацію процесу моніторингу водних ресурсів, зокрема, моніторингу рівня води, температури води, кислотно-лужного балансу води, хімічного складу води, швидкості потоку води, наявності домішок у воді за результатами виконаних теоретичних та практичних досліджень.

Актуальність впровадження кіберфізичної системи моніторингу водних ресурсів в Україні зумовлена кількома критичними факторами, які підкреслюють необхідність використання таких технологій для сталого управління водними ресурсами. По-перше, Україна стикається з низкою проблем у сфері водних ресурсів, зокрема, дефіцитом води в окремих регіонах, забрудненням водойм та змінами клімату, що призводять до змін у режимі опадів та підвищення температури. Кіберфізична система дозволяє оперативно отримувати інформацію про стан водних ресурсів, миттєво реагувати на зміни та ефективно управляти водними ресурсами, мінімізуючи негативні наслідки таких змін. По-друге, сучасні методи моніторингу, що використовують датчики для вимірювання хімічного складу води, рівня, температури та інших параметрів, надають точнішу та швидшу інформацію про стан водойм, що дозволяє вчасно виявляти забруднення та вживати заходів для запобігання екологічним катастрофам, а також оптимізувати водоспоживання у сільському господарстві та промисловості. По-третє, в умовах змін клімату та зростаючого попиту на водні ресурси для різних секторів економіки Україні необхідно впроваджувати інноваційні підходи до управління водними ресурсами. Кіберфізичні системи можуть стати важливим інструментом для інтеграції даних з різних джерел і автоматизації процесу прийняття рішень, що дозволяє ефективно оптимізувати використання води та знизити її витрати. Враховуючи ці фактори, впровадження кіберфізичних систем моніторингу водних ресурсів є важливим кроком на шляху до сталого управління водними ресурсами в Україні, що сприятиме збереженню екологічного балансу, покращенню якості води та ефективному використанню цього стратегічного ресурсу.

В першому розділі виконано аналіз відомих методів та рішень щодо моніторингу стану водних ресурсів.

У другому розділі здійснено вибір датчиків для формування нижнього рівня кіберфізичної системи моніторингу водних ресурсів. Для цього використаємо датчик Risinglink Smart Monitor для вимірювання рівня води, який має оптимальне співвідношення ціни та діапазону вимірювань, автономне живлення та підтримку комунікації через поширений протокол Wi-Fi, а також мобільне сповіщення, що зручно для впровадження в систему. Для вимірювання температури води обраний датчик HOBO MX2201, а для вимірювання кислотно-лужного балансу води – датчик PASCO Wireless pH Sensor (PS-3204), який має низьку вартість і бездротову передачу через Bluetooth, що забезпечує зручність у використанні. Для визначення хімічного складу води використовується датчик Yosemitech Y4001 Handheld Multiparameter Water Quality Meter, який дозволяє вимірювати до п'яти параметрів одночасно та має бездротове підключення, що зручно для мобільного використання. Для вимірювання швидкості потоку води обраний датчик AquaQube 1000, а для визначення наявності домішок у воді – датчик Aqua TROLL 500.

Також в другому розділі здійснено вибір контролера для формування середнього рівня кіберфізичної системи моніторингу водних ресурсів. Для цього використаємо контролер Raspberry Pi – одноплатний комп'ютер, який чудово підходить для збору, обробки та передачі даних з сенсорів завдяки своїй гнучкості, компактності та можливості підключення до мережі.

Окрім цього, в другому розділі розглянуто стандарти передачі даних між компонентами системи моніторингу водних ресурсів. Оскільки більшість обраних датчиків для вимірювання якості води підтримують передачу даних через Wi-Fi або Bluetooth, у розробленій кіберфізичній системі моніторингу водних ресурсів будуть використовуватися ці стандарти для передачі даних.

У третьому розділі розроблено метод діяльності кіберфізичної системи моніторингу водних ресурсів, який забезпечує інтеграцію фізичних (сенсори, об'єкти) та кібернетичних (аналітика, керування) компонентів, автономність функціонування (без постійного втручання людини), масштабованість (можливість

розширення географії моніторингу), а також безперервність спостереження (цілодобове спостереження в реальному часі).

Практичне значення цього методу полягає в тому, що він дозволяє ефективно управляти водними ресурсами, забезпечуючи їх сталість, якість та доступність для різних сфер використання, від побутових до промислових. Впровадження цієї системи допомагає зменшити ризики екологічних катастроф, покращити моніторинг забруднення, забезпечити ефективне управління водними ресурсами в умовах зміни клімату та урбанізації. Вона дозволяє своєчасно виявляти потенційно небезпечні рівні забруднення води, такі як підвищення концентрації токсичних речовин, важких металів, пестицидів чи патогенних мікроорганізмів, та оперативно вживати заходи для попередження або зменшення негативного впливу на екосистеми і здоров'я людини. Крім того, система допомагає уникнути екологічних катастроф, забруднення джерел питної води, приймати обґрунтовані рішення щодо водоспоживання в сільському господарстві, промисловості та водопостачанні. Вона також дозволяє автоматизувати етапи збору та обробки даних, знижувати витрати часу та ресурсів, підвищувати швидкість реагування на зміни в екологічній ситуації, а також підвищувати точність прогнозів для забезпечення відповідності екологічним вимогам і міжнародним стандартам.

Окрім цього, в третьому розділі розроблено алгоритм діяльності кіберфізичної системи, який забезпечує автоматичне, безперервне та надійне спостереження за станом водного середовища. Це дозволяє своєчасно реагувати на небезпеки, приймати обґрунтовані управлінські рішення та забезпечувати стале використання водних ресурсів. Алгоритм є інтелектуальним ядром цифрового екологічного моніторингу, який має переваги не лише в оперативному контролі якості води, а й у створенні екологічно безпечної інфраструктури, стійкої до ризиків і змін навколишнього середовища. Він забезпечує автоматизований, високоточний контроль стану водного середовища в реальному часі, здатний виявляти відхилення, реагувати на критичні події, прогнозувати зміни та підтримувати прийняття рішень. Система є масштабованою, економічно ефективною та сприяє прозорості екологічного моніторингу, що є ключовим

елементом сталого управління водними ресурсами та запобігання екологічним ризикам.

У четвертому розділі розроблено архітектуру кіберфізичної системи моніторингу водних ресурсів, яка являє собою інтегроване технологічне середовище, що об'єднує фізичні компоненти (датчики, контролери) із цифровими (програмне забезпечення, алгоритми аналізу, передача даних) для безперервного контролю якості води. Система працює в реальному часі, автоматично збираючи, обробляючи та аналізуючи дані про фізико-хімічні властивості води, виявляючи відхилення від встановлених норм і передаючи результати на хмарні або локальні сервери. Додатково в розділі наведено приклади функціонування цієї системи, що підтверджують важливість впровадження кіберфізичних систем для сталого розвитку, ефективного управління водними ресурсами та забезпечення екологічної безпеки на різних рівнях.

*Наукова новизна отриманих результатів:* вдосконалено метод діяльності кіберфізичної системи моніторингу водних ресурсів, що відрізняється від існуючих аналогів кіберфізичною інтеграцією (поєднанням фізичних (сенсори, об'єкти) та кібернетичних (аналітика, керування) компонентів) та забезпечує автономність (здатність функціонувати без постійного втручання людини), масштабованість (можливість розширення географії моніторингу), безперервність моніторингу (цілодобове спостереження в реальному часі).

*Практична значущість отриманих результатів* полягає у реалізації кіберфізичної системи моніторингу водних ресурсів, яка забезпечує збір та моніторинг параметрів водних ресурсів у реальному часі.

За темою кваліфікаційної роботи опублікована одна стаття у фаховому науковому журналі України категорії Б (додаток А):

1) Yu. Voichur, A. Balan. Method of operation of the cyber-physical water resources monitoring system. Computer systems and information technologies. 2025. №1. Pp. 48-53. <https://doi.org/10.31891/csit-2025-1-6>

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. A review of watershed-scale water quality monitoring: Integrating real-time systems monitoring and spatial modeling for sustainable water resource management / S. Syafriadi et al. *Archives of Environmental Protection*. 2025. P. 12–31.
2. Domnori E., Elmazi D., Tace G. Enhancing Water Resource Management through IoT-Enabled Smart Water Monitoring Systems: A Multi-Agent Algorithm Approach. *2024 International Conference on INnovations in Intelligent SysTems and Applications (INISTA)*, Craiova, Romania, 4–6 September 2024. 2024. P. 1–6.
3. SIGFIS: a Geographic Information System for Monitoring the Use of Water Resources in the State of Pernambuco / H. A. d. L. Ferreira et al. *Revista de Gestão Social e Ambiental*. 2024. Vol. 18, no. 1. P. e07744.
4. Optimization of Water Resources through the Implementation of a Monitoring System based on the Use of IOT Technology / D. Lizana-Alcalde et al. *2024 7th International Conference on Electronics, Communications, and Control Engineering (ICECC)*, Kuala Lumpur, Malaysia, 22–24 March 2024. 2024. P. 77–82.
5. Mendoza L., Wang I., Cáceres D. Monitoring System for Physical and Chemical Components in Panama's Water Resources. *2024 IEEE 33rd International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*, Ulsan, Korea, Republic of, 18–21 June 2024. 2024.
6. Integrated water resources monitoring system within the structure of environmental safety in southern Ukraine / O. Nazarenko et al. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2024. No. 3. P. 122–127.
7. Development of an Integrated Water Body Surveillance System for Environmental Monitoring and Resource Management / J. Manikandan et al. *2024 International Conference on Communication, Computing and Internet of Things (IC3IoT)*, Chennai, India, 17–18 April 2024. 2024.
8. Water Resource Monitoring For The Drainage Systems Contaminated By Radiation Based On The Complex Of Satellite Imaging And Ground Observations (In The Context Of Regional Climate Changes) / O. T. Azimov et al. *Kosmična nauka i tehnologija*. 2024. Vol. 30, no. 2. P. 69–92.

9. Olatinwo S. O., Joubert T. H. Resource Allocation Optimization in IoT-Enabled Water Quality Monitoring Systems. *Sensors*. 2023. Vol. 23, no. 21. P. 8963.
10. A First Step towards Developing a Decision Support System Based on the Integration of Environmental Monitoring Activities for Regional Water Resource Protection / C. Massarelli et al. *Hydrology*. 2023. Vol. 10, no. 8. P. 174.
11. Bezsonnyi V. Use of the entropy approach in water resource monitoring systems. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, series 'Geology. Geography. Ecology'*. 2023. No. 58. P. 302–320.
12. Advanced Continuous Monitoring System–Tools for Water Resource Management and Decision Support System in Salt Affected Delta / M. Reljić et al. *Agriculture*. 2023. Vol. 13, no. 2. P. 369.
13. Efficient Water Resource Management: An IoT-Based Smart Water Level Monitoring and Control System / P. B. Agarkar et al. *2023 4th International Conference on Computation, Automation and Knowledge Management (ICCAKM)*, Dubai, United Arab Emirates, 12–13 December 2023. 2023.
14. Uncrewed Aerial Systems in Water Resource Management and Monitoring: A Review of Sensors, Applications, Software, and Issues / V. Mishra et al. *Advances in Civil Engineering*. 2023. Vol. 2023. P. 1–28.
15. Chen H., Wang H. Design of monitoring data visualization system of water resources based on J2EE architecture. *Desalination And Water Treatment*. 2022. Vol. 269. P. 303–312.
16. Awareness Raising and Capacity Building through a Scalable Automatic Water Harvest Monitoring System to Improve Water Resource Management in Monteverde Community, Costa Rica / R. Brenes et al. *EFITA International Conference*. Basel Switzerland, 2022.
17. Autonomous Monitoring System for Water Resources based on PSO and Gaussian Process / M. Jara Ten Kathen et al. *2021 IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC)*, Kraków, Poland, 28 June – 1 July 2021. 2021.
18. Real-Time Smart Water Management System (SWMS) for Smart Home / A. Verma et al. *Lecture Notes in Civil Engineering*. Singapore, 2023. P. 129–137.

19. An integrated smart water management system for efficient water conservation / J. Rajanbabu et al. *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*. 2025. Vol. 15, no. 1. P. 635.
20. Pandian C., Alphonse P. J. A. Leak detection and leak localization in a smart water management system using computational fluid dynamics (CFD) and deep learning (DL). *International Journal of Information Technology*. 2024.
21. Pandian C., Alphonse P. J. A. Using computational fluid dynamics and deep learning for leak detection and localization in a smart water management system. *Discover Computing*. 2024. Vol. 27, no. 1.
22. Case study: a smart water grid in Singapore / M. Allen et al. *Water Practice and Technology*. 2012. Vol. 7, no. 4.
23. IBM Intelligent Water Platform. URL: [https://public.dhe.ibm.com/software/solutions/cities/pdfs/water/v10/en/water\\_infocenter.pdf](https://public.dhe.ibm.com/software/solutions/cities/pdfs/water/v10/en/water_infocenter.pdf).
24. Meeting Minutes: SmartWater Plus Pilot Project IT Collaboration Discussion. URL: <https://g-smartfuture.com/?topic=meeting-minutes-smartwater-plus-pilot-project-it-collaboration-discussion>.
25. Sustainable Urban Water Management in China: A Case Study from Guangzhou and Kunming / S. Yang et al. *Applied Sciences*. 2021. Vol. 11, no. 21. P. 10030.
26. SWITCH in the city. URL: <https://ruaf.org/assets/2019/11/SWITCH-in-the-city-Putting-urban-water-use-to-the-test.pdf>.
27. River and Lake Water Quality Monitoring. URL: <https://laois.ie/environment/water-quality/river-and-lake-water-quality-monitoring>.
28. National Hydrology Project. URL: <https://nhp.mowr.gov.in/>.
29. Aquarius: Clean Enjoyable Water Worldwide. URL: <https://aquarius-systems.com/>.
30. Smart Water Grid Research Group Project: An Introduction to the Smart Water Grid Living-Lab Demonstrative Operation in YeongJong Island, Korea / K.-M. Koo et al. *Sustainability*. 2021. Vol. 13, no. 9. P. 5325.

31. Application of Drone Technologies in Surface Water Resources Monitoring and Assessment: A Systematic Review of Progress, Challenges, and Opportunities in the Global South / M. Sibanda et al. *Drones*. 2021. Vol. 5, no. 3. P. 84.
32. A Bayesian Optimization Approach for Water Resources Monitoring Through an Autonomous Surface Vehicle: The Ypacarai Lake Case Study / F. P. Samaniego et al. *IEEE Access*. 2021. Vol. 9. P. 9163–9179.
33. Application of GPS Technology in Hydrology and Water Resources Monitoring. *Foreign Language Science and Technology Journal Database Engineering Technology*. 2022.
34. Design and Analytical Performances of a Diclofenac Biosensor for Water Resources Monitoring / Y. Mazouzi et al. *ACS Sensors*. 2021. Vol. 6. Issue 9. Pp. 3485–3493.
35. Biosensor Technologies for Water Quality: Detection of Emerging Contaminants and Pathogens / A. Fdez-Sanromán et al. *Biosensors*. 2025. Vol. 15, no. 3. P. 189.
36. Fast and Efficient sensing of Drugs in Water Using Self-Assembling D-Glucamine functionalized Naphthalenediimide and 1,8-Naphthalimide Fluorophores / S. Marullo et al. *Chemistry – A European Journal*. 2024.
37. Wang J. Water resource brand marketing strategy based on cloud computing. *Journal of Computational Methods in Sciences and Engineering*. 2024. Vol. 24, no. 6. P. 3660–3672.
38. Development of an Earth Observation Cloud Platform in Support to Water Resources Monitoring / A. Bucur et al. *Earth Observation Open Science and Innovation*. Cham, 2018. P. 275–283.
39. Spatiotemporal monitoring of climate change impacts on water resources using an integrated approach of remote sensing and Google Earth Engine / M. Kazemi Garajeh et al. *Scientific Reports*. 2024. Vol. 14, no. 1.
40. Lv X., Li H., Li H. A node coverage algorithm for a wireless-sensor-network-based water resources monitoring system. *Cluster Computing*. 2017. Vol. 20, no. 4. P. 3061–3070.

41. Shaohong M. X. Q. X. J. S. An IoT-Based System for Water Resources Monitoring and Management. *2015 7th International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics (IHMSC)*, Hangzhou, China, 26–27 August 2015. 2015.

42. A Systematic Review on Advancements in Remote Sensing for Assessing and Monitoring Land Use and Land Cover Changes Impacts on Surface Water Resources in Semi-Arid Tropical Environments / M. J. Mashala et al. *Remote Sensing*. 2023. Vol. 15, no. 16. P. 3926.

43. A prototype platform for water resources monitoring and early recognition of critical droughts in Switzerland / M. Zappa et al. *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences*. 2014. Vol. 364. P. 492–498.

44. Addressing Grand Challenges in Earth Observation Science: The Earth Observation Data Centre for Water Resources Monitoring / W. Wagner et al. *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2014. Vol. II-7. P. 81–88.

45. A review on magnetic sensors for monitoring of hazardous pollutants in water resources / A. Hojjati-Najafabadi et al. *Science of The Total Environment*. 2022. Vol. 824. P. 153844.

46. GIS for Water Resources Monitoring and Forecasting. *Geographic Information Systems in Water Resources Engineering*. 2016. P. 257–280.

47. Mapping Prospective Areas of Water Resources and Monitoring Land Use/Land Cover Changes in an Arid Region Using Remote Sensing and GIS Techniques / T. Sun et al. *Water*. 2022. Vol. 14, no. 15. P. 2435.

48. Water Resources in Africa under Global Change: Monitoring Surface Waters from Space / F. Papa et al. *Surveys in Geophysics*. 2022.

49. Global water resources and the role of groundwater in a resilient water future / B. R. Scanlon et al. *Nature Reviews Earth & Environment*. 2023.

50. Nine years of water resources monitoring over the middle reaches of the Yangtze River, with ENVISAT, MODIS, Beijing-1 time series, Altimetric data and field

measurements / Y. Hervé et al. *Lakes & Reservoirs: Research & Management*. 2021. Vol. 16, no. 3. P. 231–247.

51. Bhavya R., Elango L. Ant-Inspired Metaheuristic Algorithms for Combinatorial Optimization Problems in Water Resources Management. *Water*. 2023. Vol. 15, no. 9. P. 1712.

52. Drogkoula M., Kokkinos K., Samaras N. A Comprehensive Survey of Machine Learning Methodologies with Emphasis in Water Resources Management. *Applied Sciences*. 2023. Vol. 13, no. 22. P. 12147.

53. Monitoring Water Resources Governance Progress Globally: Experiences from Monitoring SDG Indicator 6.5.1 on Integrated Water Resources Management Implementation / M. Bertule et al. *Water*. 2018. Vol. 10, no. 12. P. 1744.

54. High-resolution mass spectrometry to complement monitoring and track emerging chemicals and pollution trends in European water resources / W. Brack et al. *Environmental Sciences Europe*. 2019. Vol. 31, no. 1.

55. Arabatzis S., Manos B. An integrated system for water resources monitoring, economic evaluation and management. *Operational Research*. 2025. Vol. 5, no. 1. P. 193–208.

56. Makanda K., Nzama S., Kanyerere T. Assessing the Role of Water Resources Protection Practice for Sustainable Water Resources Management: A Review. *Water*. 2022. Vol. 14, no. 19. P. 3153.

57. Environmental monitoring of water resources with the use of PoS index: a case study from Subarnarekha River basin, India / S. K. Gautam et al. *Environmental Earth Sciences*. 2018. Vol. 77, no. 3.

58. Use of satellite remote sensing as a monitoring tool for land and water resources development activities in an Indian tropical site / M. D. Behera et al. *Environmental Monitoring and Assessment*. 2018. Vol. 190, no. 7.

59. Egbueri J. C., Agbasi J. C. Performances of MLR, RBF-NN, and MLP-NN in the evaluation and prediction of water resources quality for irrigation purposes under two modeling scenarios. *Geocarto International*. 2022. P. 1–28.

60. Citizen Science for Water Resources Management: Toward Polycentric Monitoring and Governance? / W. Buytaert et al. *Journal of Water Resources Planning and Management*. 2016. Vol. 142, no. 4. P. 01816002.
61. Monitoring Hydrological Processes for Land and Water Resources Management in a Mediterranean Ecosystem: The Alento River Catchment Observatory / N. Romano et al. *Vadose Zone Journal*. 2018. Vol. 17, no. 1. P. 180042.
62. Emerging Tools for Continuous Nutrient Monitoring Networks: Sensors Advancing Science and Water Resources Protection / B. A. Pellerin et al. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*. 2016. Vol. 52, no. 4. P. 993–1008.
63. Dube T., Shekede M. D., Massari C. Remote Sensing for Water Resources and Environmental Management. *Remote Sensing*. 2022. Vol. 15, no. 1. P. 18.
64. GIS for Water Resources Monitoring and Forecasting. Geographic Information Systems in Water Resources Engineering. 2018. P. 233–255.
65. An Integrative Information Aqueduct to Close the Gaps between Satellite Observation of Water Cycle and Local Sustainable Management of Water Resources / Z. Su et al. *Water*. 2020. Vol. 12, no. 5. P. 1495.
66. Winter melt trends portend widespread declines in snow water resources / K. N. Musselman et al. *Nature Climate Change*. 2021. Vol. 11, no. 5. P. 418–424.
67. Mohammad-Azari S., Bozorg-Haddad O., Loáiciga H. A. State-of-art of genetic programming applications in water-resources systems analysis. *Environmental Monitoring and Assessment*. 2020. Vol. 192, no. 2.
68. Inter-basin hydropolitics for optimal water resources allocation / M. Kazemi et al. *Environmental Monitoring and Assessment*. 2020. Vol. 192, no. 7.
69. A sensitive and robust method for automated on-line monitoring of enzymatic activities in water and water resources / G. Ryzinska-Paier et al. *Water Science and Technology*. 2014. Vol. 69, no. 6. P. 1349–1358.
70. Satellite Remote Sensing for Water Resources Management: Potential for Supporting Sustainable Development in Data-Poor Regions / J. Sheffield et al. *Water Resources Research*. 2018. Vol. 54, no. 12. P. 9724–9758.

71. The future of evapotranspiration: Global requirements for ecosystem functioning, carbon and climate feedbacks, agricultural management, and water resources / J. B. Fisher et al. *Water Resources Research*. 2017. Vol. 53, no. 4. P. 2618–2626.

72. Qu S., Lv J., Liu J. Visualization Analysis for Global Water Resources Based on Digital Earth. *Journal of Coastal Research*. 2020. Vol. 105, sp1.

73. An efficient IoT based smart water quality monitoring system / E. E.-D. Hemdan et al. *Multimedia Tools and Applications*. 2023.

74. A review on plankton as a bioindicator: A promising tool for monitoring water quality / P. Chandel et al. *World Water Policy*. 2023.

75. Wang X., Xie H. A Review on Applications of Remote Sensing and Geographic Information Systems (GIS) in Water Resources and Flood Risk Management. *Water*. 2018. Vol. 10, no. 5. P. 608.

76. Managing Water, Soil and Waste Resources to Achieve Sustainable Development Goals / ed. by S. Hülsmann, R. Ardakanian. Cham: Springer International Publishing, 2018.

77. Transboundary Water Resources for People and Nature: Challenges and Opportunities in the Olifants River Basin / A. Mirzabaev et al. *SSRN Electronic Journal*. 2019.

78. Towards Synoptic Water Monitoring Systems: A Review of AI Methods for Automating Water Body Detection and Water Quality Monitoring Using Remote Sensing / L. Yang et al. *Sensors*. 2022. Vol. 22, no. 6. P. 2416.

79. A New Clustering Method to Generate Training Samples for Supervised Monitoring of Long-Term Water Surface Dynamics Using Landsat Data through Google Earth Engine / A. Taheri Dehkordi et al. *Sustainability*. 2022. Vol. 14, no. 13. P. 8046.

80. Smart IoT and Machine Learning-based Framework for Water Quality Assessment and Device Component Monitoring / A. Bhardwaj et al. *Environmental Science and Pollution Research*. 2022.

81. IoT-Based Fish Farm Water Quality Monitoring System / C.-H. Chen et al. *Sensors*. 2022. Vol. 22, no. 17. P. 6700.

**ДОДАТОК А**  
(обов'язковий)

**КОПІЇ СТАТТІ У ФАХОВОМУ НАУКОВОМУ ВИДАННІ**

1) Yu. Voichur, A. Balan. Method of operation of the cyber-physical water resources monitoring system. Computer systems and information technologies. 2025. №1. Pp. 48-53. <https://doi.org/10.31891/csit-2025-1-6>

## METHOD OF OPERATION OF THE CYBER-PHYSICAL WATER RESOURCES MONITORING SYSTEM

*The relevance of designing and developing a cyber-physical water monitoring system for Ukraine is driven by the need for effective water management in the face of climate change, water pollution, and growing water supply needs. Modern challenges, such as the lack of clean drinking water, irrational use of resources, emergency condition of water supply networks and environmental threats, require the introduction of innovative technologies. The use of sensor networks, artificial intelligence, and cloud computing allows us to quickly obtain information about water quality and quantity, predict changes, and prevent emergencies. The introduction of cyber-physical systems in the field of water resources monitoring will help to increase the efficiency of water management, reduce losses, improve the ecological condition of water bodies and provide the population with quality water. For Ukraine, where water security is a strategic issue, such solutions will be an important step towards sustainable development and environmental balance. The use of Internet of Things (IoT), Big Data, and artificial intelligence technologies can automate the processes of data collection, analysis, and forecasting, which will help optimize water use, prevent pollution, and increase the efficiency of water infrastructures. Thus, the task of designing and developing a cyber-physical water resources monitoring system is currently relevant for Ukraine.*

*The article develops a method for the operation of a cyber-physical water resources monitoring system that provides cyber-physical integration (a combination of physical (sensors, objects) and cybernetic (analytics, control) components), autonomy (the ability to function without constant human intervention), scalability (the ability to expand the geography of monitoring), and monitoring continuity (round-the-clock real-time monitoring).*

*Keywords: cyber-physical system, water resources monitoring parameters, water resources monitoring, sensors and IoT devices for measuring water level, water temperature, water pH-balance, water chemical composition, water flow rate, impurities presence in water.*

Юрій ВОЙЧУР, Андрій БАЛАН  
 Хмельницький національний університет

## МЕТОД ДІЯЛЬНОСТІ КІБЕРФІЗИЧНОЇ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ ВОДНИХ РЕСУРСІВ

*Актуальність проектування та розроблення кіберфізичної системи моніторингу водних ресурсів для України обумовлена необхідністю ефективного управління водними ресурсами в умовах змін клімату, забруднення водойм та зростаючих потреб у водопостачанні. Сучасні виклики, такі як нестача чистої питної води, нераціональне використання ресурсів, аварійний стан водопровідних мереж та екологічні загрози, вимагають запровадження інноваційних технологій. Використання сенсорних мереж, штучного інтелекту та хмарних обчислень дозволяє оперативно отримувати інформацію про якість та кількість води, прогнозувати зміни та запобігати надзвичайним ситуаціям. Впровадження кіберфізичних систем у сфері моніторингу водних ресурсів сприятиме підвищенню ефективності управління водними ресурсами, зменшенню втрат, покращенню екологічного стану водойм та забезпеченню населення якісною водою. Для України, де питання водної безпеки є стратегічним, такі рішення стануть важливим кроком до сталого розвитку та екологічної рівноваги. Завдяки застосуванню технологій Інтернету речей (IoT), великих даних (Big Data) та штучного інтелекту можна автоматизувати процеси збору, аналізу та прогнозування, що допоможе оптимізувати водокористування, запобігати забрудненню та підвищувати ефективність водних інфраструктур. Отже, задача проектування та розроблення кіберфізичної системи моніторингу водних ресурсів є наразі актуальною для України.*

*У статті розроблений метод діяльності кіберфізичної системи моніторингу водних ресурсів, який забезпечує кіберфізичну інтеграцію (поєднання фізичних (сенсори, об'єкти) та кібернетичних (аналітика, керування) компонентів), автономність (здатність функціонувати без постійного втручання людини), масштабованість (можливість розширення географії моніторингу), безперервність моніторингу (цілодобове спостереження в реальному часі).*

*Ключові слова: кіберфізична система, параметри моніторингу водних ресурсів, моніторинг водних ресурсів, датчики та IoT-пристрої для вимірювання рівня води, температури, кислотно-лужного балансу, хімічного складу води, швидкості потоку, наявності домішок у воді.*

### Introduction

The relevance of water resources monitoring is determined by their critical importance for human life, the economy, and ecosystems. In the face of increasing pressure on water resources, climate change, urbanization, and pollution, it is necessary to ensure timely monitoring of their condition for effective management and conservation [1].

Monitoring water resources is essential for ensuring water security, as monitoring the quality of drinking water helps prevent the spread of diseases, and identifying pollution and its sources makes it possible to respond to environmental threats in a timely manner. It also plays an important role in preserving environmental safety and biodiversity, as pollution of aquatic ecosystems negatively affects the level of oxygen in water and leads to eutrophication, which can lead to the death of aquatic organisms [2].

An important aspect is the impact of water resources on the economy and the agricultural sector, as their use in industry, energy, and agriculture requires monitoring the water level in reservoirs to ensure the stability of

irrigation systems and the operation of hydroelectric power plants. In the context of climate change, monitoring helps to detect changes in hydrological processes, control precipitation, droughts, and floods, which is important for adaptation to new climate conditions [3].

In addition, international obligations and legislation require compliance with environmental standards and the introduction of modern technologies for precise control, including satellite monitoring, IoT sensors, and GIS technologies. Monitoring of water resources helps reduce risks, increase management efficiency, and ensure the sustainability of ecosystems [4].

The development of technologies significantly expands the possibilities of water resources monitoring, ensuring high accuracy and efficiency of data acquisition. The use of satellite imagery makes it possible to track changes in aquatic ecosystems on a global scale, including fluctuations in water levels in rivers, lakes and reservoirs, as well as the impact of climate change on their condition. Remote sensing and drones allow for localized research with high detail, which is especially important for water quality control [5].

Sensor systems and the Internet of Things (IoT) play an important role, allowing for real-time monitoring of physical and chemical parameters of water, such as pH, temperature, dissolved oxygen concentration, and the presence of toxic substances. This allows not only to respond quickly to pollution threats, but also to predict possible environmental risks, model the spread of pollution, and assess the impact of various factors on the state of water resources [6].

Water monitoring is also an important tool for developing effective water management policies. It helps governments and international organizations to implement measures to rationalize water use, protect water bodies from depletion and pollution, and adapt to climate change. In the context of global warming and the increase in extreme weather events, monitoring allows forecasting floods and droughts, helping to reduce their negative impact on the economy.

International cooperation plays a significant role in the development of monitoring systems, as many water bodies are transboundary and environmental problems have no national borders. Joint monitoring programs and data exchange between countries contribute to more efficient water management, which, in turn, has a positive impact on environmental safety and sustainable development [7].

Thus, modern water resources monitoring is a multicomponent system that combines advanced technologies, scientific research, and management solutions. Its relevance is only growing in the face of global challenges, which requires further development of data collection, analysis, and forecasting methods. Investments in these areas will help to preserve water resources, improve the quality of life and ensure sustainable development of society [8].

A cyber-physical water monitoring system is a set of interconnected technological solutions that combine physical components, sensors, computer algorithms, and communication tools to collect, process, and analyze data on the state of the aquatic environment. It provides continuous monitoring of water quality, water level, temperature, flow rate, and other parameters, allowing for rapid response to changes and identification of potential threats [9].

The basis of such a system is a network of sensors and detectors placed in water bodies, water intake points, and other key locations. They transmit data via wireless technologies, such as NB-IoT, LoRaWAN, or satellite channels, to data centers where the information is analyzed using artificial intelligence and machine learning algorithms. This allows not only to monitor the current state of water resources, but also to predict possible threats, such as pollution, droughts, or floods.

Such systems play a key role in data visualization, creating pollution maps, and modeling the spread of pollutants. The use of Big Data allows for the identification of patterns and the generation of recommendations to optimize water management. Such systems can be integrated with smart city platforms to improve the efficiency of water use in utilities and industry [10].

A cyber-physical system can also include automated control mechanisms, such as controlling gateways or pumping stations based on forecasts and actual data. This helps minimize the impact of natural disasters, prevent overuse of water resources, and maintain water quality at the required level.

Due to its adaptability and integration with cloud technologies, such a system can be scaled to meet the needs of different regions and ensure sustainable development of the water sector. The introduction of cyber-physical systems in the field of water resources monitoring is an important step towards effective management of natural resources, environmental safety and reduction of the negative impact of human activity on the environment [11].

A cyber-physical water resources monitoring system consists of several main components that ensure its effective operation.

The sensor network is a key element of the system, as it includes a variety of sensors that measure water parameters such as pollution levels, temperature, pH, dissolved oxygen, electrical conductivity, and other characteristics. These sensors can be located on the surface of water bodies, underwater, or on the banks and operate in real time [12].

Transmission technologies provide a continuous flow of data from sensors to computing centers. They can include cellular communications (3G, 4G, 5G), LPWAN protocols (LoRa, NB-IoT), satellite communications, or wired connections depending on the location and data rate requirements.

Computing power and analytical algorithms allow processing the received data, analyzing it and generating forecasts. The use of artificial intelligence and machine learning helps to detect anomalies in water resources, predict environmental threats, and optimize the management of water systems [13].

Geographic information systems (GIS) provide data visualization in the form of interactive maps that display changes in water resources. This helps to make informed decisions about their management, track sources of pollution, and analyze spatial patterns.

User interfaces allow professionals to work with the system through special web platforms, mobile applications, or integrated solutions for municipal authorities, businesses, and environmental services. They provide access to current and archived data, analytical reports, and management tools [14].

Automated control systems can include response mechanisms, such as adjusting gateways, controlling pumping stations, or activating water treatment systems when dangerous changes in its composition are detected.

Cloud technologies and data warehouses provide centralized storage and processing of information, allowing the system to be scaled to meet user needs and integrated with other environmental or industrial platforms [15].

Thus, a cyber-physical water resources monitoring system combines physical, digital, and analytical components to create an effective mechanism for monitoring, analyzing, and managing the state of aquatic ecosystems.

The development of cyber-physical systems for water resources monitoring faces a number of challenges that require an integrated approach to their solution [16, 17].

One of the main problems is infrastructure constraints. In many regions, especially in developing countries, there is a lack of adequate technical base for the implementation of smart sensor networks and IoT solutions. Insufficient digitalization and the poor quality of existing water communications can make it difficult to integrate cyber-physical systems.

Financial barriers also play an important role. The high cost of implementing modern sensors, cloud platforms, and analytical algorithms can be an obstacle for governments and companies that want to use these technologies. Despite the long-term benefits, such projects require significant investment.

Another challenge is ensuring the accuracy and reliability of the data. In real-world environments, sensors can be subject to errors due to climatic factors, technical malfunctions, or contamination. This requires the development of effective methods for calibration, self-diagnosis, and automatic data correction.

Cybersecurity and data protection are critical aspects of cyber-physical systems. Since they work with a large amount of data in real time, there is a risk of hacker attacks and unauthorized access to information. The development of reliable mechanisms for encryption, secure data storage and transmission is a priority.

As for the future, cyber-physical water monitoring systems have great potential for improvement through artificial intelligence and machine learning. Integration of big data analysis algorithms will allow for more accurate forecasting of changes in aquatic ecosystems, predicting droughts, floods, or pollution.

Satellite monitoring and remote sensing play a significant role in the development of such systems. The combination of satellite imagery and sensor networks provides a more detailed picture of the state of water resources at the global level, which is important for climate change control and water balance management.

Expanding cooperation between government agencies, research institutes, and the private sector will facilitate the massive implementation of cyber-physical systems. The creation of open platforms for environmental data exchange will help improve the efficiency of water management and develop more sustainable water strategies.

In general, further development of cyber-physical water monitoring systems will contribute to the rational use of water, reduce environmental risks, and ensure a stable water supply for future generations.

There are several well-known cyber-physical water resources monitoring systems that have been implemented in different countries and are used to monitor the state of aquatic ecosystems.

Smart Water Management System (SWMS) [18-21] is a smart water management system that is being implemented in many countries to monitor water quality and quantity. It uses sensors, IoT devices, satellite imagery, and machine learning algorithms to analyze changes in water resources. It is a comprehensive cyber-physical system that combines modern technologies such as the Internet of Things (IoT), artificial intelligence (AI), cloud computing, and big data analytics to effectively manage water resources. The main functions of SWMS are: 1) real-time water resource monitoring – the system uses sensors to collect information about water level, water quality, temperature, pipeline pressure, pollution levels, and other parameters; the data is transmitted to a cloud platform for further processing; 2) control and optimization of water consumption – SWMS allows consumers (cities, enterprises, households) to analyze water consumption and find ways to reduce it; smart water meters help identify leaks and inefficient use of water resources; 3) automatic detection of leaks and accidents – thanks to machine learning algorithms, the system can detect anomalies in the operation of water supply networks and signal possible leaks or accidents, which significantly reduces water losses; 4) forecasting changes in water resources – SWMS analyzes large data sets (historical, climatic, environmental) to predict droughts, floods or changes in water quality; this helps management bodies respond to potential threats in a timely manner; 5) automation of processes in water management – the system can automatically manage water supply, regulate the operation of pumping stations, activate treatment systems or redistribute resources between different consumers; 6) support for sustainable

development and ecological balance - SWMS contributes to the conservation of water resources, minimizes the negative impact of human activity on the environment and helps provide clean water for the population. Examples of SWMS implementation: Singapore Smart Water Grid [22] – a smart water management system in Singapore that monitors water quality and optimizes its distribution; IBM Intelligent Water Platform [23] – a solution for cities and industries that helps reduce water losses and improve water network management; Smart Water Pilot Project in Barcelona [24] – integration of sensors to track water consumption and reduce costs. SWMS is an important tool in the field of water resources management, as it helps to optimize water use, improve its quality, minimize losses and prevent environmental disasters. In the future, the implementation of such systems will become a key factor in solving global water supply problems and climate change.

Sustainable Water Management in Urban China (SWITCH) [25, 26] is a water and wastewater monitoring system in China that helps improve water management in megacities. It integrates data from water quality sensors, climate models, and GIS analytics.

River and Lake Water Quality Monitoring System in the European Union (WATERMON) [27] is a pan-European water quality monitoring system operating under the EU Water Policy Directive. It uses automated monitoring stations that measure the physical and chemical parameters of water and transmit the data to a single database for analysis and management.

India's National Hydrology Project (NHP) [28] is an initiative of the Government of India that uses cyber-physical systems to collect and analyze hydrological data. It includes intelligent sensor networks, big data analytics, and predictive models for water management.

Aquarius System (USA & Canada) [29] is a cyber-physical water monitoring system used in the USA and Canada to monitor drinking water quality, manage rivers and reservoirs. It uses IoT, satellite monitoring and cloud technologies to process large amounts of data.

Smart Water Grid in South Korea [30] is an innovative water management system in South Korea that uses cyber-physical approaches to optimize water supply and minimize water losses in urban networks.

Copernicus Programme – Water Monitoring Service is a European satellite monitoring program that analyzes the state of water bodies based on remote sensing data of the Earth. It is used to assess the level of pollution, changes in the water balance and identify environmental threats.

All these systems demonstrate the effectiveness of using cyber-physical technologies to monitor water resources, contributing to their conservation, rational use and timely response to potential threats.

These examples indicate that the concept of using cyber-physical technologies for monitoring water resources is widely used worldwide and has significant potential. Currently, such a concept is poorly used for the development of Ukrainian cities, mainly due to the high cost, although it has enormous potential for them, especially during post-war reconstruction.

Therefore, the task of designing and developing a cyber-physical system for monitoring water resources is currently relevant for Ukraine. This study will be devoted to the development of a method that underlies the operation of a cyber-physical system for monitoring water resources.

#### **Method of Operation of The Cyber-Physical Water Resources Monitoring System**

For this study, the specific objective will be to measure various parameters of water resources and ongoing monitoring of water resources.

*The method of operation of the cyber-physical water resources monitoring system* consists of the following steps:

*physical level (sensor network):*

- 1) selection of water resources monitoring parameters: water level ( $wl$ ), water temperature ( $wt$ ), water ph-balance ( $wph$ ), water chemical composition ( $wcc$ ), water flow rate ( $wfr$ ), impurities presence in water ( $ipw$ ), etc.;
- 2) formation of a set of normal values of water resources monitoring parameters (taking into account the location of water resources monitoring): water level ( $nwl$ ), water temperature ( $nwt$ ), water ph-balance ( $nwph$ ), water chemical composition ( $nwcc$ ), water flow rate ( $nwfr$ ), impurities presence in water ( $nipw$ ), etc.:  $NWMP = \{nwmp1, nwmp2, \dots, nwmp6\} = \{nwl, nwt, nwph, nwcc, nwfr, nipw\}$ , upon exceeding which, for example, the generation of automated solutions (launching treatment systems, regulating water supply, etc.) and notification of operators occurs;
- 3) selection and installation of a sensor network at strategic points where it is necessary to organize water monitoring – selection of sensors and IoT devices for measuring water level, temperature, ph-balance, chemical composition of water, flow rate, presence of impurities in water, etc. for continuous data collection from reservoirs, rivers, lakes, groundwater;
- 4) collection of data from installed sensors connected to the Internet of Things network, and formation of the set  $WMP = \{wmp1, wmp2, \dots, wmp6\} = \{wl, wt, wph, wcc, wfr, ipw\}$  at a certain point in time;

*cybernetic level (data processing and transmission):*

- 5) use of wireless networks (LoRa, NB-IoT, LTE, Wi-Fi, etc.) to transmit information to the cloud or local processing center with ensuring data security and integrity during transmission;

- 6) collection of information on cloud servers or local computing nodes;
- 7) preliminary filtering and aggregation of data;
- 8) visualization of data in real time through digital panels;

*analytical and management levels (data processing and decision-making):*

- 9) analysis of received data in real time in order to identify deviations, anomalies, predict changes, model scenarios of the impact of various factors on the state of water resources, identify potential threats within the framework of ensuring water resources monitoring:
  - 9.1) if the water level ( $wl$ ) is significantly higher or significantly lower than the normal water level ( $nwl$ ), then signals about dangerous deviations or violations are generated, operators are notified, after which automated decisions are generated (launching treatment systems, regulating water supply, etc.) or operator response;
  - 9.2) if the water temperature ( $wt$ ) is significantly higher or significantly lower than the normal water temperature for a given season in a given area ( $nwt$ ), then signals are generated about dangerous deviations or violations, operators are notified, after which automated decisions are generated (launching treatment systems, regulating water supply, etc.) or operator response;
  - 9.3) if the ph-balance ( $wph$ ) is significantly higher or significantly lower than the normal ph-balance ( $nwph$ ), then signals are generated about dangerous deviations or violations, operators are notified, after which automated decisions are generated (launching treatment systems, regulating water supply, etc.) or operator response;
  - 9.4) if the chemical composition of water ( $wcc$ ) differs significantly from the normal water chemical composition ( $nwcc$ ), then signals are generated about dangerous deviations or violations, operators are notified, after which automated decisions are generated (launching treatment systems, regulating water supply, etc.) or operator response;
  - 9.5) if the water flow rate ( $wfr$ ) is significantly higher or significantly lower than the normal water flow rate ( $nwfr$ ), then signals are generated about dangerous deviations or violations, operators are notified, after which automated decisions are generated (launching treatment systems, regulating water supply, etc.) or operator response;
  - 9.6) if the level of impurities in water ( $ipw$ ) is significantly higher than the normal level of impurities ( $nipw$ ), then signals are generated about dangerous deviations or violations, operators are notified, after which automated decisions are generated (launching treatment systems, regulating water supply, etc.) or operator response;

*reporting and visualization:*

- 10) long-term storage of information for trend analysis and forecasting;
- 11) construction of graphs, maps, control panels;
- 12) generation of reports for state bodies, environmental institutions, the public, etc. with support for data transparency and openness standards.

The developed method for the operation of a cyber-physical water resources monitoring system provides cyber-physical integration (a combination of physical (sensors, objects) and cybernetic (analytics, control) components), autonomy (the ability to function without constant human intervention), scalability (the ability to expand the geography of monitoring), and monitoring continuity (round-the-clock real-time monitoring).

### Conclusions

The relevance of designing and developing a cyber-physical water monitoring system for Ukraine is driven by the need for effective water management in the face of climate change, water pollution, and growing water supply needs. Modern challenges, such as the lack of clean drinking water, irrational use of resources, emergency condition of water supply networks and environmental threats, require the introduction of innovative technologies. The use of sensor networks, artificial intelligence, and cloud computing allows us to quickly obtain information about water quality and quantity, predict changes, and prevent emergencies. The introduction of cyber-physical systems in the field of water resources monitoring will help to increase the efficiency of water management, reduce losses, improve the ecological condition of water bodies and provide the population with quality water. For Ukraine, where water security is a strategic issue, such solutions will be an important step towards sustainable development and environmental balance. The use of Internet of Things (IoT), Big Data, and artificial intelligence technologies can automate the processes of data collection, analysis, and forecasting, which will help optimize water use, prevent pollution, and increase the efficiency of water infrastructures. Thus, the task of designing and developing a cyber-physical water resources monitoring system is currently relevant for Ukraine.

The article develops a method for the operation of a cyber-physical water resources monitoring system that provides cyber-physical integration (a combination of physical (sensors, objects) and cybernetic (analytics, control) components), autonomy (the ability to function without constant human intervention), scalability (the ability to expand the geography of monitoring), and monitoring continuity (round-the-clock real-time monitoring).

### References

1. A review of watershed-scale water quality monitoring: Integrating real-time systems monitoring and spatial modeling for sustainable water resource management / S. Syafriadi et al. Archives of Environmental Protection. 2025. P. 12–31.
2. Domnori E., Elmazi D., Tace G. Enhancing Water Resource Management through IoT-Enabled Smart Water Monitoring Systems: A Multi-Agent Algorithm Approach. 2024 International Conference on INnovations in Intelligent SysTems and Applications (INISTA), Craiova, Romania, 4–6 September 2024. 2024. P. 1–6.
3. SIGFIS: a Geographic Information System for Monitoring the Use of Water Resources in the State of Pernambuco / H. A. d. L. **Ferreira et al. Revista de Gestão Social e Ambiental**. 2024. Vol. 18, no. 1. P. e07744.
4. Optimization of Water Resources through the Implementation of a Monitoring System based on the Use of IOT Technology / D. Lizana-Alcalde et al. 2024 7th International Conference on Electronics, Communications, and Control Engineering (ICECC), Kuala Lumpur, Malaysia, 22–24 March 2024. 2024. P. 77–82.
5. **Mendoza L., Wang I., Cáceres D. Monitoring System for Physical and Chemical Components in Panama's Water Resources**. 2024 IEEE 33rd International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), Ulsan, Korea, Republic of, 18–21 June 2024. 2024.
6. Integrated water resources monitoring system within the structure of environmental safety in southern Ukraine / O. Nazarenko et al. Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu. 2024. No. 3. P. 122–127.
7. Development of an Integrated Water Body Surveillance System for Environmental Monitoring and Resource Management / J. Marikandan et al. 2024 International Conference on Communication, Computing and Internet of Things (IC3IoT), Chennai, India, 17–18 April 2024. 2024.
8. Water Resource Monitoring For The Drainage Systems Contaminated By Radiation Based On The Com Plex Of Satellite Imaging And Ground Observations (In The Context Of Regional Climate Change) / O. T. **Azimov et al. Kosmicheska nauka i tehnologija**. 2024. Vol. 30, no. 2. P. 69–92.
9. Olatinwo S. O., Joubert T. H. Resource Allocation Optimization in IoT-Enabled Water Quality Monitoring Systems. Sensors. 2023. Vol. 23, no. 21. P. 8963.
10. A First Step towards Developing a Decision Support System Based on the Integration of Environmental Monitoring Activities for Regional Water Resource Protection / C. Massarelli et al. Hydrology. 2023. Vol. 10, no. 8. P. 174.
11. Bezsonnyi V. Use of the entropy approach in water resource monitoring systems. Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, series 'Geology, Geography, Ecology'. 2023. No. 58. P. 302–320.
12. **Advanced Continuous Monitoring System—Tools for Water Resource Management and Decision Support System in Salt Affected Delta / M. Rajić et al. Agricultura**. 2023. Vol. 13, no. 2. P. 369.
13. Efficient Water Resource Management: An IoT-Based Smart Water Level Monitoring and Control System / P. B. Agarkar et al. 2023 4th International Conference on Computation, Automation and Knowledge Management (ICCAKM), Dubai, United Arab Emirates, 12–13 December 2023. 2023.
14. Uncrewed Aerial Systems in Water Resource Management and Monitoring: A Review of Sensors, Applications, Software, and Issues / V. Mishra et al. Advances in Civil Engineering. 2023. Vol. 2023. P. 1–28.
15. Chen H., Wang H. Design of monitoring data visualization system of water resources based on J2EE architecture. Desalination And Water Treatment. 2022. Vol. 269. P. 303–312.
16. Awareness Raising and Capacity Building through a Scalable Automatic Water Harvest Monitoring System to Improve Water Resource Management in Monteverde Community, Costa Rica / R. Brenes et al. EFTIA International Conference. Basel Switzerland, 2022.
17. Autonomous Monitoring System for Water Resources based on PSO and Gaussian Process / M. Jara Ten Kathen et al. 2021 IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC), Krakow, Poland, 28 June – 1 July 2021. 2021.
18. Real-Time Smart Water Management System (SWMS) for Smart Home / A. Verma et al. Lecture Notes in Civil Engineering. Singapore, 2023. P. 129–137.
19. An integrated smart water management system for efficient water conservation / J. Rajanbahu et al. International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE). 2025. Vol. 15, no. 1. P. 635.
20. Pandian C., Alphonse P. J. A. Leak detection and leak localization in a smart water management system using computational fluid dynamics (CFD) and deep learning (DL). International Journal of Information Technology. 2024.
21. Pandian C., Alphonse P. J. A. Using computational fluid dynamics and deep learning for leak detection and localization in a smart water management system. Discover Computing. 2024. Vol. 27, no. 1.
22. Case study: a smart water grid in Singapore / M. Allen et al. Water Practice and Technology. 2012. Vol. 7, no. 4.
23. IBM Intelligent Water Platform. URL: [https://public.dhe.ibm.com/software/solutions/cities/pdfs/water/v10/en/water\\_infocenter.pdf](https://public.dhe.ibm.com/software/solutions/cities/pdfs/water/v10/en/water_infocenter.pdf).
24. Meeting Minutes: SmartWater Plus Pilot Project IT Collaboration Discussion. URL: <https://g-smartfuture.com/?topic=meeting-minutes-smartwater-plus-pilot-project-it-collaboration-discussion>.
25. Sustainable Urban Water Management in China: A Case Study from Guangzhou and Kunming / S. Yang et al. Applied Sciences. 2021. Vol. 11, no. 21. P. 10030.
26. SWITCH in the city. URL: <https://naaf.org/assets/2019/11/SWITCH-in-the-city-Putting-urban-water-use-to-the-test.pdf>.
27. River and Lake Water Quality Monitoring. URL: <https://kois.ie/environment/water-quality/river-and-lake-water-quality-monitoring>.
28. National Hydrology Project. URL: <https://nhp.mowr.gov.in/>.
29. Aquarius: Clean Enjoyable Water Worldwide. URL: <https://aquarius-systems.com/>.
30. Smart Water Grid Research Group Project: An Introduction to the Smart Water Grid Living-Lab Demonstrative Operation in Yeongjong Island, Korea / K.-M. Koo et al. Sustainability. 2021. Vol. 13, no. 9. P. 5325.

<b>Yurii Voichur</b> <b>Юрій Воїчур</b>	PhD, Senior Lecturer of Computer Engineering & Information Systems Department, Khmelnytskyi National University <a href="https://orcid.org/0000-0003-3085-7315">https://orcid.org/0000-0003-3085-7315</a> e-mail: <a href="mailto:voichury@khnmu.edu.ua">voichury@khnmu.edu.ua</a>	Доктор філософії, старший викладач кафедри комп'ютерної інженерії та інформаційних систем, Хмельницький національний університет
<b>Andrii Balan</b> <b>Андрій Балан</b>	Master Student of Computer Engineering & Information Systems Department, Khmelnytskyi National University e-mail: <a href="mailto:abalan@ukr.net">abalan@ukr.net</a>	Магістрант кафедри комп'ютерної інженерії та інформаційних систем, Хмельницький національний університет

**ДОДАТОК Б**  
(обов'язковий)

**ПРЕЗЕНТАЦІЯ ДО ЗАХИСТУ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ**

# МЕТОД ТА КІБЕРФІЗИЧНА СИСТЕМА МОНІТОРИНГУ ВОДНИХ РЕСУРСІВ

Студент Андрій БАЛАН  
Керівник д.ф., ст. викл. Юрій ВОЙЧУР

- **Мета кваліфікаційної роботи** – автоматизація процесу моніторингу водних ресурсів, зокрема, моніторингу рівня води, температури води, кислотно-лужного балансу води, хімічного складу води, швидкості потоку води, наявності домішок у воді шляхом створення кіберфізичної системи моніторингу водних ресурсів
- **Об'єкт дослідження** – процес автоматизації моніторингу водних ресурсів
- **Предмет дослідження** – метод та кіберфізична система моніторингу водних ресурсів

- **Наукова новизна отриманих результатів:** вдосконалено метод діяльності кіберфізичної системи моніторингу водних ресурсів, що відрізняється від існуючих аналогів кіберфізичною інтеграцією (поєднанням фізичних (сенсори, об'єкти) та кібернетичних (аналітика, керування) компонентів) та забезпечує автономність (здатність функціонувати без постійного втручання людини), масштабованість (можливість розширення географії моніторингу), безперервність моніторингу (цілодобове спостереження в реальному часі).
- **Практична значущість отриманих результатів** полягає у реалізації кіберфізичної системи моніторингу водних ресурсів, яка забезпечує збір та моніторинг параметрів водних ресурсів у реальному часі.

## Публікація

За темою кваліфікаційної роботи опублікована одна стаття у фаховому науковому журналі України категорії Б:

Yu. Voichur, A. Balan. Method of operation of the cyber-physical water resources monitoring system. Computer systems and information technologies. 2025. №1. Pp. 48-53.

<https://doi.org/10.31891/csit-2025-1-6>

## АКТУАЛЬНІСТЬ ДОСЛІДЖЕННЯ

- Актуальність моніторингу водних ресурсів визначається їхнім критичним значенням для життєдіяльності людини, економіки та екосистем.
- Моніторинг водних ресурсів є необхідним для забезпечення водної безпеки.
- Важливим аспектом є вплив водних ресурсів на економіку та аграрний сектор.
- Отже, сучасний моніторинг водних ресурсів є багатокомпонентною системою, яка поєднує передові технології, наукові дослідження та управлінські рішення. Його актуальність лише зростає в умовах глобальних викликів.

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

**Для розроблення кіберфізичної системи моніторингу водних ресурсів слід розв'язати наступні задачі:**

- аналіз відомих методів та рішень для моніторингу водних ресурсів;
- вибір компонентів для кіберфізичної системи моніторингу водних ресурсів;
- розроблення методу діяльності кіберфізичної системи моніторингу водних ресурсів;
- розроблення архітектури кіберфізичної системи моніторингу водних ресурсів;
- проведення експериментів із використанням розробленої кіберфізичної системи моніторингу водних ресурсів.

## НИЖНІЙ РІВЕНЬ СИСТЕМИ – ДАТЧИКИ

Датчик Risinglink Smart Monitor



Датчик HОBО MX2201



Датчик PASCO Wireless pH Sensor



Датчик Yosemite Y4001 Handheld Multiparameter Water Quality Meter



Датчик Aqua TROLL 500



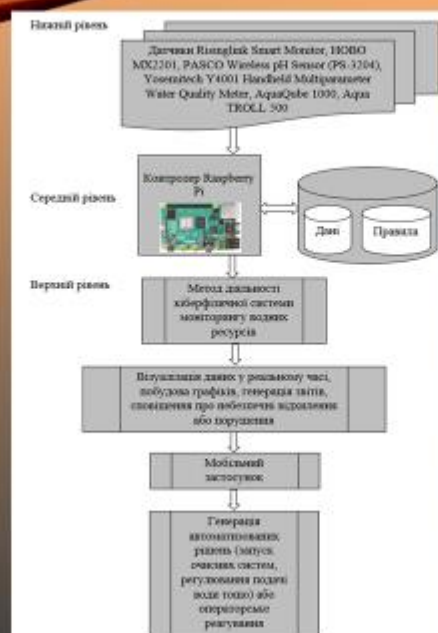
## СЕРЕДНІЙ РІВЕНЬ СИСТЕМИ – КОНТРОЛЕР



## МЕТОД ДІЯЛЬНОСТІ КІБЕРФІЗИЧНОЇ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ ВОДНИХ РЕСУРСІВ:

- 1) вибір параметрів моніторингу водних ресурсів: рівень води ( $wl$ ), температура ( $wt$ ), кислотно-лужний баланс ( $wph$ ), хімічний склад ( $wcc$ ), швидкість потоку ( $wfr$ ), наявність домішок ( $ipw$ ) тощо;
- 2) формування множини нормальних значень параметрів моніторингу водних ресурсів (з врахуванням місця моніторингу водних ресурсів)  $NWMP = \{nwmp1, nwmp2, \dots, nwmp6\} = \{nwl, nwt, nwph, nwcc, nwfr, nipw\}$ , по перевищенню яких відбувається, наприклад, генерація автоматизованих рішень та сповіщення операторів;
- 3) підбір та встановлення сенсорної мережі у стратегічних точках, де необхідно організувати моніторинг води;
- 4) збір даних з встановлених датчиків, підключених у мережу Інтернету речей, та формування множини  $WMP = \{wmp1, wmp2, \dots, wmp6\} = \{wl, wt, wph, wcc, wfr, ipw\}$  в певний момент часу;
- 5) використання бездротових мереж (Bluetooth, Wi-Fi тощо) для передачі інформації у хмару;
- 6) збір інформації на хмарних серверах або локальних обчислювальних вузлах;
- 7) попередня фільтрація та агрегація даних;
- 8) візуалізація даних у реальному часі через цифрові панелі;

- 9) аналіз отриманих даних в реальному часі з метою виявлення відхилень, аномалій, прогнозування змін, моделювання сценаріїв впливу різних факторів на стан водних ресурсів, виявлення потенційних загроз в рамках забезпечення моніторингу водних ресурсів;
- 10) довготривале зберігання інформації для аналізу трендів та прогнозування;
- 11) побудова графіків, карт, панелей управління;
- 12) генерація звітів для державних органів, екологічних інституцій, громадськості тощо із підтримкою стандартів прозорості та відкритості даних.



## АРХІТЕКТУРА КІБЕРФІЗИЧНОЇ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ ВОДНИХ РЕСУРСІВ

## ПРИКЛАДИ ФУНКЦІЮВАННЯ КІБЕРФІЗИЧНОЇ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ ВОДНИХ РЕСУРСІВ

- У центральній частині міста встановлено сенсорну мережу, що включає датчики Risinglink Smart Monitor, HOB0 MX2201 та PASC0 Wireless pH Sensor. Система щогодини фіксує підвищення рівня домішок ( $i_{rw}$ ) та зміну pH ( $w_{ph}$ ), що збігається з викидом стічних вод із промислової зони. Після фіксації відхилення від нормальних значень ( $n_{i_{rw}}$  та  $n_{w_{ph}}$ ), Raspberry Pi передає дані через Wi-Fi на хмарний сервер, де формується тривожний сигнал. Автоматично надсилається сповіщення до муніципальної служби з рекомендаціями перевірити джерело забруднення та запустити локальні очисні фільтри.
- У гірському районі, де можливі раптові паводки, датчики рівня води (Risinglink) та швидкості потоку (AquaQube 1000) встановлені в руслі річки. Система виявляє швидке зростання показників  $w_l$  та  $w_{fr}$ , що перевищує порогові значення ( $n_{w_l}$  та  $n_{w_{fr}}$ ). Контролер Raspberry Pi негайно надсилає інформацію через Bluetooth до локального шлюзу, а далі в хмару. Дані візуалізуються на цифровій панелі у центрі моніторингу, активується попередження для місцевого населення та служб надзвичайних ситуацій.

## ВИСНОВКИ

У роботі забезпечено автоматизацію процесу моніторингу водних ресурсів, зокрема, моніторингу рівня води, температури води, кислотно-лужного балансу води, хімічного складу води, швидкості потоку води, наявності домішок у воді за результатами виконаних теоретичних та практичних досліджень.

У розділі 1 кваліфікаційної роботи проведений аналіз відомих методів та рішень для моніторингу водних ресурсів.

У розділі 2 здійснений вибір компонентів для кіберфізичної системи моніторингу водних ресурсів.

У розділі 3 кваліфікаційної роботи розроблені метод та алгоритм діяльності кіберфізичної системи моніторингу водних ресурсів.

У розділі 4 спроектовано кіберфізичну систему моніторингу водних ресурсів.

## Протокол аналізу звіту подібності експертом

Заявляю, що я ознайомився (-лась) з Повним звітом подібності, який був згенерований Системою виявлення і запобігання плагіату щодо роботи:

**Автор:** Андрій БАЛАН

**Співавтор:**

**Назва:** Балан\_Метод та кіберфізична система моніторингу водних ресурсів

**Експерт:**

**Підрозділ:** Кафедра комп'ютерної інженерії та інформаційних систем

**Коефіцієнт подібності 1:** 12.5%

**Коефіцієнт подібності 2:** 7.1%

**Мікропробіли:** 8

**Заміна букв:** 9

**Інтервали:** 0

**Білі знаки:** 1

**Дата створення звіту:** 2025-05-11 17:58:28.0

Після аналізу Звіту подібності констатую наступне:

Запозичення, виявлені в роботі є законними і не є плагіатом. Рівень подібності не перевищує допустимої межі. Таким чином робота незалежна і приймається.

Запозичення не є плагіатом, але перевищено граничне значення рівня подібностей. Таким чином робота повертається на доопрацювання.

Виявлено запозичення і плагіат або навмисні текстові спотворення (маніпуляції), як передбачувані спроби укриття плагіату, які роблять роботу невідповідною вимогам законодавства (Ст. 32. ЗУ Про вищу освіту, пункт 3.1, Ст. 42. ЗУ Про освіту) та вимог НАЗЯВО (Критерій 5), а також кодексу етики і процедурам. Таким чином робота не приймається.

Обґрунтування:

2025-05-11

Дата

Доцент Андрій Нічепорук

експерт

### Anti-Plagiarism v-15.274 Educational

The maximum coincidence with one document 1.0%

Dictionaries check: en\_US, ru\_RU, ua\_UA. Errors in the documents: 10%

ID: 240980 Title: МКР Метод та кіберфізична система моніторингу водних ресурсів Added in a DB: 025-05-11 Authors: Андрій БАЛАН Heads: Юрій ВОЙЧУР Consultants: Opponents:	Document		Sum coincidence on the DB	
	Symbols	Lexemes	Symbols	Lexemes
	136422	829	1879 (1%)	20 (2%)

Plagiarism sources		Plagiarism presence in the document	
ID	Description	Symbols	Lexemes

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

РЕЦЕНЗІЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Дипломник: Балан Андрій Григорович

Тема: Метод та кіберфізична система моніторингу водних ресурсів

Спеціальність: 123 «Комп'ютерна інженерія»

Обсяг кваліфікаційної роботи:

Кількість сторінок записки 103

1. Короткий зміст роботи та прийнятих рішень: Метою кваліфікаційної роботи є автоматизація управління водними ресурсами для покращення якості життя населення шляхом розроблення методу та кіберфізичної системи моніторингу водних ресурсів.

2. Висновок про відповідність роботи дипломному завданню: Робота повністю відповідає поставленому завданню.

3. Характеристика виконання кожного розділу, ступінь використання останніх досягнень науки і техніки і передових методів роботи: У розділі 1 проведений аналіз відомих методів та рішень моніторингу водних ресурсів. У розділі 2 кваліфікаційної роботи виконано вибір датчиків для формування системи моніторингу водних ресурсів. Крім цього, у розділі 2 кваліфікаційної роботи виконано вибір контролера для кіберфізичної системи моніторингу водних ресурсів та вибір стандарту передачі даних. В розділі 2 кваліфікаційної роботи також розроблені правила для прийняття рішень щодо перевищення/неперевищення норми рівня забруднення води одним чи декількома забруднювачами. В розділі 3 кваліфікаційної роботи розроблений метод моніторингу водних ресурсів, який становить основу кіберфізичної системи моніторингу водних ресурсів. В розділі 4 кваліфікаційної роботи вдосконалено архітектуру кіберфізичної системи моніторингу водних ресурсів.

4. Позитивні сторони роботи: розроблення методу та архітектури кіберфізичної системи

5. Негативні сторони роботи: мало уваги приділено формалізації системи

6. Оцінка графічного оформлення та пояснювальної записки роботи: Пояснювальна записка оформлена коректно, згідно з діючими стандартами оформлення документації.

7. Відгук про роботу в цілому: Робота виконана на середньому науково-технічному рівні.

8. Інші зауваження: \_\_\_\_\_

9. Оцінка дипломної роботи: добре/С (3.75).

Рецензент (прізвище, ім'я, по батькові, посада, місце роботи) Бармак О.В.,  
д.т.н., проф., завідувач кафедри КН ХНУ

“ ” \_\_\_\_\_ 2025 р.

\_\_\_\_\_ (підпис)

Завідувачу кафедри КПС  
д-ру філософії Ользі ПАВЛОВІЙ

БАЛАНА Андрія Григоровича

ПІБ здобувача вищої освіти

ФІТ, 2 курсу, групи КІ2М-23-2

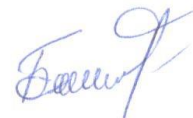
### ЗАЯВА

З правилами чинного Положення «Про систему забезпечення академічної доброчесності у Хмельницькому національному університеті», згідно з яким виявлення плагіату є підставою для відмови в допуску кваліфікаційної роботи до захисту та застосування заходів дисциплінарної та академічної відповідальності, ознайомлений (а). Про використання програмно-технічних засобів для перевірки кваліфікаційних робіт здобувачів вищої освіти на плагіат оповіщений(а) та надаю свою згоду на обробку та збереження університетом моєї роботи в інституційному репозитарії університету.

Також надаю університету право на передачу моєї роботи для обробки та збереження в базах даних програмно-технічних засобів (Unicheck та Anti-Plagiarism) та використання роботи для виявлення плагіату в інших роботах, які перевіряються програмно-технічними засобами та користувачами, що мають доступ до цих програмно-технічних засобів, виключно в обмежених цілях для виявлення плагіату в текстах робіт.

Робота для перевірки університетом надається в друкованому та електронному варіанті. Електронна версія моєї роботи збігається (ідентична) з друкованою.

10 травня 2025 року



РІШЕННЯ ЕКСПЕРТНОЇ КОМІСІЇ  
КАФЕДРИ КОМП'ЮТЕРНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ ТА ІНФОМАЦІЙНИХ СИСТЕМ  
ПРО ДОПУСК КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ ДО ЗАХИСТУ

Підтверджуємо ознайомлення з результатом звіту подібності щодо роботи, генерованого системою виявлення текстових збігів/ідентичності/схожості:

Назва: Метод та кіберфізична система моніторингу водних ресурсів

Автор: Балан Андрій Григорович

Спеціальність: 123 – Компютерна інженерія

Освітня програма: освітньо-наукова

Науковий керівник: Войчур Юрій Олексійович, д.ф, старший викладач

Після аналізу звіту подібності зроблено такий висновок:

№	Висновок	Позначка про відповідність
1	Запозичення, виявлені в роботі, є законними і не є плагіатом. Робота приймається до захисту.	відповідає
2	Виявлені запозичення не є плагіатом, розміщені в розділах, які не описують безпосередньо авторське дослідження, але кількість цитат перевищує обсяг, виправданий поставленою метою роботи. Робота приймається до захисту, але має бути відкоригована. Відкоригований варіант має бути поданий на кафедру за 2 дні до захисту, разом із заявою щодо самостійності виконання письмової роботи та ідентичності друкованої та електронної версії роботи	
3	Виявлені запозичення не є плагіатом, але частково розміщені в розділах, які описують безпосередньо авторське дослідження, а кількість цитат перевищує обсяг, виправданий поставленою метою роботи. В зв'язку з цим мета роботи та поставлені завдання не були досягнені. Робота може бути допущена до захисту (наступного року) після того як буде відкоригована та допрацьована і успішно пройде повторну перевірку на академічний плагіат.	
4	Робота містить навмисні текстові спотворення, передбачувані спроби укриття запозичень або інші прояви академічного плагіату. Робота містить фабрикацію або фальсифікацію даних. Робота не допускається до захисту.	

Підтвердження:

Запозичення, виявлені в роботі, є законними і не є плагіатом, оскільки:

- 1) запозичення розміщені в розділах аналізу існуючих аналогів та прототипів, які не описують безпосередньо авторське дослідження і не стосуються результатів роботи;
- 2) усі запозичення фрагментарні, або мають належним чином оформленні посилання;
- 3) найбільшу схожість встановлено з одним документом (статтею автора кваліфікаційної роботи, написаною за результатами цієї кваліфікаційної роботи) і становить вона 4.04%;
- 4) всі зафіксовані системою ознаки модифікації тексту відносяться до комбінування латинських символів зі україномовними скороченнями індексів в формулах, що не є модифікацією тексту

Сумарний обсяг всіх запозичень, визначений системою виявлення збігів/ідентичності/схожості, складає 12.52% і адресується до 41 першоджерела, що, з урахуванням наведених обґрунтувань, відповідає характеру наукового дослідження і свідчить на користь кваліфікаційної роботи.

Керівник роботи



Ю. О. Войчур

Гарант ОНП



О. С. Савенко

Завідувач кафедри КІС



О. О. Павлова