

## Цифровізація та «розумні» мережі водопостачання/водовідведення

Маріанна Процик, студентка<sup>1</sup> (ORCID: 0009-0006-0551-2752),  
Алевтина Лясковська, студентка<sup>11</sup> (ORCID: 0009-0000-7046-620X)

<sup>1</sup>Київський національний університет будівництва і архітектури, Україна

### АНОТАЦІЯ

У статті розглянуто сучасні підходи до цифровізації систем водопостачання та водовідведення з використанням технологій Інтернету речей (IoT), сенсорних мереж, Big Data та алгоритмів оптимізації. Проаналізовано практичні рішення для моніторингу параметрів у режимі реального часу, виявлення витоків, оптимізації тиску та прогнозування аварійних ситуацій. Показано, що впровадження «розумних» мереж дозволяє суттєво знизити експлуатаційні витрати, підвищити ефективність управління інфраструктурою та забезпечити сталий розвиток водопровідно-каналізаційного господарства.

*Ключові слова:* цифровізація, «розумні» мережі, водопостачання, водовідведення, IoT, сенсори, Big Data, машинне навчання, оптимізація тиску, прогнозування аварій.

### 1. ВСТУП

Традиційні методи експлуатації систем водопостачання та водовідведення не можуть гарантовано забезпечити своєчасне виявлення аварійних ситуацій, оптимальне використання ресурсів та ефективний контроль якості води. Натомість, сучасні тенденції цифровізації можуть активно змінити підходи до управління критичною інфраструктурою.

Ця робота розкриває нові методи підвищення ефективності водних ресурсів шляхом інтеграції цифрових технологій у системи водного забезпечення населених пунктів.

### 2. МЕТА

Розгляд та оцінка впровадження застосування цифрових технологій, зокрема IoT, сенсорів та Big Data, для створення «розумних» мереж водопостачання та водовідведення.

### 3. ЗАСТОСУВАННЯ ІОТ (ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ), СЕНСОРІВ ТА BIG DATA ДЛЯ МОНІТОРИНГУ ТА УПРАВЛІННЯ

Інтернет речей (IoT) у поєднанні з сенсорними технологіями та системами Big Data стає ключовим інструментом цифровізації у сфері водопостачання та водовідведення [1].



Рисунок 1. Концепція Big Data

Використання цих технологій дозволяє перейти від традиційного періодичного контролю до безперервного моніторингу стану мереж у режимі реального часу. Сучасні «розумні» системи будуються на багаторівневій архітектурі, яка включає сенсорний рівень (датчики тиску, витрат, рівня, рН, електропровідності, температури та інших параметрів якості води), мережевий рівень із використанням NB-IoT, LoRaWAN або 4G/5G для передачі сигналів, хмарні Big Data-платформи для зберігання та глибинного аналізу інформації, а також рівень управління, інтегрований із SCADA та ПС-системами.

Завдяки таким рішенням оператори отримують можливість прогнозувати витoki, аварії та зміни якості води, оптимізувати режими роботи насосів і клапанів, виявляти аномалії у споживанні та планувати ремонтні заходи на основі реальних даних. Важливою складовою є інтеграція сенсорних даних із геоінформаційними системами та гідравлічними моделями, що підвищує просторову точність аналізу та дозволяє прогнозувати поширення можливих забруднень у мережі. Для захисту від кібератак і фальсифікації показників застосовуються алгоритми виявлення аномалій та блокчейн-рішення, які забезпечують незмінність записів і прозорість даних.

Практичні впровадження IoT та Big Data у водних системах показують значні результати: втрати води можуть зменшуватись до рівня менше 10%, скорочується енергоспоживання завдяки оптимізації роботи насосних станцій, зростає швидкість реагування на аварійні ситуації, а термін експлуатації трубопроводів збільшується завдяки більш збалансованому управлінню тиском. Попри численні переваги, впровадження таких технологій супроводжується низкою викликів, серед яких – висока вартість обладнання, потреба у стандартизації протоколів, автономність живлення сенсорів, необхідність регулярного калібрування та підготовки персоналу для роботи з великими даними.

Подальший розвиток «розумних» водних мереж тісно пов'язаний із впровадженням новітніх підходів – глибинного навчання, edge-обчислень, цифрових двійників мереж та інтеграції у комплексні системи «розумного міста». Таким чином, IoT, сенсори та Big Data формують фундамент для створення стійких, економічно ефективних і екологічно збалансованих систем водопостачання та водовідведення майбутнього.

#### 4. СИСТЕМИ ВИЯВЛЕННЯ ВИТОКІВ ТА ОПТИМІЗАЦІЇ ТИСКУ.

Системи виявлення витоків та оптимізації тиску є важливою складовою цифровізації та створення «розумних» мереж водопостачання і водовідведення. Втрати води через витoki становлять значну частку експлуатаційних збитків та можуть сягати 20-30% від обсягів подачі. Завдяки розвитку IoT та сенсорних систем став можливим безперервний моніторинг тиску й витрат у режимі реального часу.

Методи виявлення витоків поділяються на: акустичні (звукові сенсори, «розумні кулі»), транзйентні (аналіз тискових хвиль) та дата-драйв підходи (машинне навчання, нейронні мережі, SVM, генетичні алгоритми) [2,3]. Важливою умовою є оптимальне розташування сенсорів, що визначається показниками Detection Coverage Rate (DCR) та Total Detection Sensitivity (TDS). Використання методів оптимізації (VOI, інверсна оптимізація, гідравлічне моделювання) доводить, що навіть обмежена кількість сенсорів може суттєво знизити час пошуку пошкоджень і втрати води.

Окрім виявлення витоків, системи автоматизованої оптимізації тиску підтримують стабільний гідравлічний режим, зменшують ризик аварій та подовжують термін служби мережі. Приклади з Європи та Азії підтверджують, що комплексний підхід (сенсори + алгоритми + моделювання) дозволяє зменшити втрати до рівня <10%.

Сучасні дослідження демонструють ефективність SCADA-систем, машинного навчання та підсиленого навчання (DRL) для раннього виявлення витоків і автоматичного регулювання тиску. Інтеграція високочастотних сенсорів тиску та акустичних датчиків забезпечує високу точність локалізації, а застосування графових моделей і багатокритеріальних оптимізаційних методів (наприклад NSGA-II) підвищує ефективність розміщення датчиків. Дослідження також доводять, що навіть невелика кількість правильно встановлених сенсорів може істотно покращити діагностику.

Таким чином, поєднання сенсорних систем, IoT та алгоритмів оптимізації формує основу для «розумних» водних мереж, які є більш надійними, економічними та екологічними.

#### 5. ПРОГНОЗУВАННЯ ТА ЗАПОБІГАННЯ АВАРІЯМ НА МЕРЕЖАХ ВОДОПОСТАЧАННЯ ТА ВОДОВІДВЕДЕННЯ

Аварійність на мережах водопостачання та водовідведення є однією з основних проблем сучасної комунальної інфраструктури. Часті витoki, прориви труб та перевантаження насосних станцій не лише створюють ризики для населення, але й призводять до значних економічних витрат для підприємств. Своєчасне прогнозування можливих аварій та впровадження заходів запобігання є критично важливими для забезпечення безперебійного функціонування систем.

У межах цього дослідження проводиться аналіз ефективних методів прогнозування та запобігання аварійних ситуацій на мережах водопостачання та водовідведення. Основна увага приділяється практичним подходам, які можуть бути впроваджені на рівні експлуатаційних станцій, зокрема:

- регулярні обстеження та діагностика стану трубопроводів;
- моніторинг основних параметрів мережі, таких як тиск, витрати, температура та якість води;
- планово-попереджувальні ремонти і саніція труб;
- підготовка мереж до сезонних змін навантаження та кліматичних умов.

Дослідження також розглядає накопичення та аналіз статистичних даних про аварії, що дозволяє визначати найбільш уразливі ділянки, оцінювати ризики та планувати оптимальні заходи з обслуговування мереж [2]. Використання цих методів забезпечує зниження кількості аварій, підвищення надійності систем та ефективне управління ресурсами.

Метою даного дослідження є формування комплексних рекомендацій для станцій водопостачання та водовідведення щодо впровадження превентивних заходів, що дозволяють зменшити ризики аварій та забезпечити стабільну роботу інфраструктури. На основі отриманих результатів пропонується системний підхід до моніторингу, діагностики та технічного обслуговування мереж, який може бути інтегрований у практичну діяльність підприємств водопостачання.

#### 6. ВИСНОВОК

У результаті дослідження визначено, що цифровізація систем водопостачання та водовідведення є стратегічним напрямом розвитку сучасних міст. Інтеграція IoT-технологій, сенсорних мереж та інтелектуальних алгоритмів створює основу для підвищення надійності, ефективності та екологічної безпеки інфраструктури. Використання методів машинного навчання і глибинного аналізу даних дозволяє зменшити втрати води, оптимізувати режими роботи обладнання та передбачати аварійні ситуації. Подальші перспективи розвитку полягають у впровадженні цифрових двійників, edge-обчислень та інтеграції водних мереж у комплексні системи «розумного міста».

#### Список літератури

- [1] Alzahrani, A. I. A., Chauhdary, S. H., & Alshdadi, A. A. (2023). Internet of Things (IoT)-Based Wastewater Management in Smart Cities. *Electronics*, 12(12), 2590. <https://doi.org/10.3390/electronics12122590>
- [2] Omar, A., Delnaz, A., & Nik-Bakht, M. (2023). Comparative analysis of machine learning techniques for predicting water main failures in the City of Kitchener. *Journal of Infrastructure Intelligence and Resilience*, 2(3), 100044. <https://doi.org/10.1016/j.jintel.2023.100044>
- [3] Rousso, B. Z., Lambert, M., & Gong, J. (2023). Smart water networks: A systematic review of applications using high-frequency pressure and acoustic sensors in real water distribution systems. *Journal of Cleaner Production*, 410, 137193. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137193>

<sup>i</sup> Робота виконана під керівництвом канд. техн.наук, доц. Тетяни Аргатенко.