

# КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

бакалавр

(назва освітнього ступеня)

на тему: 

Методи виявлення втрат в смарт системах водопостачання

Виконав: студент

IV курсу, групи СН-43

спеціальності

122 Комп'ютерні науки

(шифр і назва спеціальності)

|                   |                                 |                                                             |
|-------------------|---------------------------------|-------------------------------------------------------------|
|                   | <div></div> <div>(підпис)</div> | <div>Томків А.В.</div> <div>(прізвище та ініціали)</div>    |
| Керівник          | <div></div> <div>(підпис)</div> | <div>Кунанець Н.Е.</div> <div>(прізвище та ініціали)</div>  |
| Нормоконтроль     | <div></div> <div>(підпис)</div> | <div>Липак Г.І.</div> <div>(прізвище та ініціали)</div>     |
| Завідувач кафедри | <div></div> <div>(підпис)</div> | <div>Боднарчук І.О.</div> <div>(прізвище та ініціали)</div> |
| Рецензент         | <div></div> <div>(підпис)</div> | <div></div> <div>(прізвище та ініціали)</div>               |

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

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

Кафедра комп'ютерних наук  
(повна назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Боднарчук І.О.  
(підпис) (прізвище та ініціали)

« 28 » червня 2025 р.

**ЗАВДАННЯ  
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ**

на здобуття освітнього ступеня Бакалавр  
(назва освітнього ступеня)

за спеціальністю 122 Комп'ютерні науки  
(шифр і назва спеціальності)

Студенту Томків Андрій Володимирович  
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Методи виявлення втрат в смарт системах водопостачання

Керівник роботи Кунанець Наталія Едуардівна, д.н.с.к., професор кафедри КН  
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом ректора від « 7 » травня 2025 року № 4/7-444

2. Термін подання студентом завершеної роботи 28 червня 2025р.

3. Вихідні дані до роботи Наукові публікації про смарт системи водопостачання та методи виявлення втрат води

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

Вступ. 1 Аналіз предметної області області смарт водопостачання. 1.1 Опис предметної області смарт водопостачання. 1.2 Методологія дослідження та збір даних. 1.3 Результати бібліометричного аналізу публікацій щодо смарт систем водопостачання. 2 Аналіз методів виявлення витоків води для потреб смарт систем водопостачання. 2.1 Апаратні методи виявлення витоків води для потреб смарт систем водопостачання. 2.2 Розглянуто вбудовані технології виявлення витоків води в смарт системах водопостачання. 2.3 Досліджено методи виявлення витоків води в смарт системах водопостачання на основі програмного забезпечення. 3 Оцінка методів та аналіз результатів їх дослідження. 3.1 Оцінка методів виявлення витоків. 3.2 Методи смарт водопостачання. 3.3 Аналіз результатів дослідження методів виявлення витоків у системах смарт водопостачання. 4. Безпека життєдіяльності, основи охорони праці. Висновки. Перелік джерел.

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

6. Консультанти розділів роботи

| Розділ                                        | Прізвище, ініціали та посада консультанта | Підпис, дата   |                  |
|-----------------------------------------------|-------------------------------------------|----------------|------------------|
|                                               |                                           | завдання видав | завдання прийняв |
| Безпека життєдіяльності, основи охорони праці | Сенчишин В.С., доцент кафедри МТ          | 12.06.2025     | 15.06.2025       |

7. Дата видачі завдання 27 січня 2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

| № з/п | Назва етапів роботи                                                                               | Термін виконання етапів роботи | Примітка |
|-------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|----------|
| 1.    | Ознайомлення з завданням до кваліфікаційної роботи                                                | 30.01.2025                     |          |
| 2.    | Підбір джерел про смарт системи водопостачання та методи виявлення втрат води                     | 31.01.2025-03.02.2025          |          |
| 3.    | Опрацювання джерел по темі кваліфікаційної роботи                                                 | 04.02.2025-06.02.2025          |          |
| 4.    | Виконання дослідження методів виявлення втрат в смарт системах водопостачання                     | 07.02.2025-11.02.2025          |          |
| 5.    | Оформлення розділу «Аналіз предметної області області смарт водопостачання»                       | 03.06.2025-05.06.2025          |          |
| 6.    | Оформлення розділу «Аналіз методів виявлення витоків води для потреб смарт систем водопостачання» | 06.06.2025-08.06.2025          |          |
| 7.    | Оформлення розділу «Оцінка методів та аналіз результатів їх дослідження»                          | 09.06.2025-11.06.2025          |          |
| 8.    | Виконання завдання до підрозділу «Безпека життєдіяльності»                                        | 12.06.2025-13.06.2025          |          |
| 9.    | Виконання завдання до підрозділу «Основи охорони праці»                                           | 14.06.2025-15.06.2025          |          |
| 10.   | Оформлення кваліфікаційної роботи                                                                 | 16.06.2025-17.06.2025          |          |
| 11.   | Нормоконтроль                                                                                     | 18.06.2025-19.06.2025          |          |
| 12.   | Перевірка на плагіат                                                                              | 20.06.2025                     |          |
| 13.   | Попередній захист кваліфікаційної роботи                                                          | 21.06.2025                     |          |
| 14.   | Захист кваліфікаційної роботи                                                                     | 28.06.2025                     |          |
|       |                                                                                                   |                                |          |
|       |                                                                                                   |                                |          |
|       |                                                                                                   |                                |          |
|       |                                                                                                   |                                |          |
|       |                                                                                                   |                                |          |
|       |                                                                                                   |                                |          |
|       |                                                                                                   |                                |          |
|       |                                                                                                   |                                |          |
|       |                                                                                                   |                                |          |
|       |                                                                                                   |                                |          |
|       |                                                                                                   |                                |          |
|       |                                                                                                   |                                |          |
|       |                                                                                                   |                                |          |
|       |                                                                                                   |                                |          |
|       |                                                                                                   |                                |          |

Студент

(підпис)

Томків А.В.

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

Кунанець Н.Е.

(прізвище та ініціали)

## АНОТАЦІЯ

Методи виявлення втрат в смарт системах водопостачання // Кваліфікаційна робота освітнього рівня «Бакалавр» // Томків Андрій Володимирович // Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, факультет комп'ютерно-інформаційних систем і програмної інженерії, кафедра комп'ютерних наук, група СН-43 // Тернопіль, 2025 // С. 68, рис. – 5, табл. – 7, кресл. – , додат. – 0, бібліогр. – 89.

**Ключові слова:** виявлення витоків, втрати води, методи, моніторинг, програмні методи, смарт-системи водопостачання, управління мережами, штучний інтелект.

Кваліфікаційна робота присвячена дослідженню методів виявлення втрат в смарт системах водопостачання. В першому розділі кваліфікаційної роботи описано предметну область смарт водопостачання. Розглянута методологія дослідження та процес збору даних. Подано безумовні результати бібліометричного аналізу публікацій щодо смарт систем водопостачання.

В другому розділі кваліфікаційної роботи проаналізовано апаратні методи виявлення витоків води для потреб смарт систем водопостачання. Розглянуто вбудовані технології виявлення витоків води в смарт системах водопостачання. Досліджено методи виявлення витоків води в смарт системах водопостачання на основі програмного забезпечення.

В третьому розділі кваліфікаційної роботи оцінено методи виявлення витоків. Описано методи смарт водопостачання. Проаналізовано результати дослідження методів виявлення витоків у системах смарт водопостачання

У розділі «Безпека життєдіяльності, основи охорони праці» описано планування та порядок проведення евакуації населення з районів наслідків впливу надзвичайних ситуацій техногенного та природного характеру. Окремо розглянуто вплив психоемоційного навантаження на розробників програмно-алгоритмічних засобів та методи його мінімізації.

## ANNOTATION

Methods of Loss Detection in Smart Water Supply Systems // Qualification work of the educational level "Bachelor" // Tomkiv Andrii // Ternopil Ivan Pulyu National Technical University, Computer and Information Systems and Software Engineering Faculty, Computer Sciences Department, group SN-43 // Ternopil, 2025 // P. 68, fig. - 5, tabl. - 7, chair. - , annexes. – 0, references - 89.

**Keywords:** leak detection, water loss, methods, monitoring, software methods, smart water supply systems, network management, artificial intelligence.

The qualification paper is dedicated to the study of methods for detecting losses in smart water supply systems. The first section of the qualification paper describes the subject area of smart water supply. The research methodology and data collection process are reviewed. The results of the bibliometric analysis of publications on smart water supply systems are presented.

In the second section of the qualification paper, hardware methods for detecting water leaks for the needs of smart water supply systems are analyzed. Embedded technologies for detecting water leaks in smart water supply systems are considered. Software-based methods for detecting water leaks in smart water supply systems are investigated.

In the third section of the qualification paper, leak detection methods are evaluated. Smart water supply methods are described. The results of the study of leak detection methods in smart water supply systems are analyzed.

The "Life Safety, Occupational Safety Fundamentals" section describes the planning and procedure for evacuating the population from areas affected by technological and natural emergencies. The impact of psycho-emotional stress on developers of software and algorithmic tools and methods for its minimization are separately considered.

## **ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ**

ІКТ – інформаційні та комунікаційні технології.

ГІС – Геоінформаційними системами.

ЗНМ – згорткові нейронні мережі.

ІКТ – інформаційні та комунікаційні технології

ІІ – штучний інтелект.

ІІНМ – штучні нейронні мережі.

AI (англ. Artificial Intelligence) – штучний інтелект.

AMR (англ. Automatic Meter Reading) – автоматичні вимірювальні пристрої.

CFPD (англ. Comparison of Flow Pattern Distributions) – порівняння розподілів шаблонів витрат води

DMA (англ. Minimum Night Flow) – зона обліку води.

GPR (англ. Ground-Penetrating Radar) – георадар.

ITA (англ. Inverse Transient Analysis) – інверсний транзитний аналіз.

IoT (англ. Internet of Things) – Інтернет речей.

ML (англ. Machine Learning) – машинне навчання.

MNF (англ. ) – мінімальний нічний потік.

NRW (англ. Non-Revenue Water) – вода, яка не приносить доходу.

OCSVM (англ. One-Class Support Vector Machine) – однотипний SVM.

PPA (англ. Pressure Point Analysis) – метод аналізу точок тиску.

RBF (англ. Radial Basis Function) – радіально базисна функція.

RMSE (англ. Root Mean Square Error) – середньоквадратичне відхилення.

SDG (англ. Sustainable Development Goals) – Цілі сталого розвитку ООН.

SVM (англ. Support Vector Machine) – Машини підтримки векторів.

SWM (англ. Smart Water Management) – смарт-водопостачання.

WDS (англ. Water Distribution System) – системах водопостачання.

WSN (англ. Wireless Sensor Network) – Бездротова сенсорна мережа.

## ЗМІСТ

|                                                                                                                                      |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ВСТУП .....                                                                                                                          | 8  |
| РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ ОБЛАСТІ СМАРТ<br>ВОДОПОСТАЧАННЯ.....                                                             | 10 |
| 1.1 Опис предметної області смарт водопостачання .....                                                                               | 10 |
| 1.2 Методологія дослідження та збір даних .....                                                                                      | 13 |
| 1.3 Результати бібліометричного аналізу публікацій щодо смарт<br>систем водопостачання .....                                         | 14 |
| 1.4 Висновок до першого розділу .....                                                                                                | 18 |
| РОЗДІЛ 2. АНАЛІЗ МЕТОДІВ ВИЯВЛЕННЯ ВИТОКІВ ВОДИ ДЛЯ<br>ПОТРЕБ СМАРТ СИСТЕМ ВОДОПОСТАЧАННЯ.....                                       | 19 |
| 2.1 Апаратні методи виявлення витоків води для потреб смарт систем<br>водопостачання .....                                           | 19 |
| 2.2 Розглянуто вбудовані технології виявлення витоків води в смарт<br>системах водопостачання.....                                   | 24 |
| 2.3 Досліджено методи виявлення витоків води в смарт системах<br>водопостачання на основі програмного забезпечення .....             | 26 |
| 2.4 Висновок до другого розділу .....                                                                                                | 34 |
| РОЗДІЛ 3. ОЦІНКА МЕТОДІВ ТА АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ЇХ<br>ДОСЛІДЖЕННЯ .....                                                               | 36 |
| 3.1 Оцінка методів виявлення витоків .....                                                                                           | 36 |
| 3.2 Методи смарт водопостачання.....                                                                                                 | 42 |
| 3.3 Аналіз результатів дослідження методів виявлення витоків у<br>системах смарт водопостачання.....                                 | 46 |
| 3.4 Висновок до третього розділу .....                                                                                               | 51 |
| РОЗДІЛ 4. БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ, ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ                                                                              | 52 |
| 4.1 Планування та порядок проведення евакуації населення з районів<br>наслідків впливу НС техногенного та природного характеру ..... | 52 |

|                                                                                                                           |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 4.2 Вплив психоемоційного навантаження на розробників програмно-<br>алгоритмічних засобів та методи його мінімізації..... | 55 |
| 4.3 Висновок до четвертого розділу .....                                                                                  | 58 |
| ВИСНОВКИ.....                                                                                                             | 59 |
| ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ.....                                                                                                       | 60 |



## ВСТУП

**Актуальність теми.** Проблема втрат води у водопровідних мережах є однією з найбільш гострих та економічно значущих глобальних проблем сьогодення, що суттєво впливає на стійкість водопостачання та ефективність використання ресурсів. За даними ООН, до 2030 року дефіцит води може сягнути 40% від світового попиту, при цьому значна частина втрат припадає на витоки у застарілих інфраструктурах. В умовах посилення кліматичних змін, зростання урбанізації та потреби у сталому розвитку, мінімізація втрат води стає не просто економічною необхідністю, а й критичним фактором екологічної безпеки та соціальної відповідальності. Необліковані витрати води призводять не лише до прямих фінансових збитків для комунальних підприємств та кінцевих споживачів, а й до нераціонального використання цінних природних ресурсів, збільшення енергоспоживання на перекачування та очищення води, а також потенційних ризиків для громадського здоров'я через пошкодження трубопроводів.

Впровадження концепції смарт-систем водопостачання (SWM) є відповіддю на ці виклики, пропонуючи інтеграцію сучасних інформаційних та комунікаційних технологій, сенсорних мереж, аналізу великих даних та штучного інтелекту для оптимізації всіх етапів водопостачання, від джерела до споживача. У цьому контексті, розробка та вдосконалення методів виявлення втрат набуває особливої актуальності. Традиційні підходи до виявлення витоків часто є трудомісткими, дорогими та неефективними, особливо у великих та розгалужених мережах, що обмежує їхнє оперативне застосування. Смарт системи, використовуючи автоматизований збір даних у режимі реального часу та передові аналітичні інструменти, створюють унікальні можливості для проактивного, точного та швидкого виявлення витоків, що є ключовим для мінімізації втрат та підвищення загальної ефективності системи.

Дослідження та оцінка апаратних, програмних, а також інтегрованих підходів, зокрема з використанням машинного та глибокого навчання, дасть

визначити найбільш перспективні та ефективні рішення для впровадження у сучасні смарт мережі водопостачання. Тому, актуальність кваліфікаційної роботи полягає у необхідності систематизації та глибокого аналізу існуючих та новітніх методів виявлення втрат в умовах смарт-систем водопостачання.

**Мета і задачі дослідження.** Комплексно проаналізувати, дослідити та оцінити сучасні апаратні та програмні методи виявлення втрат води для розробки ефективних рішень у смарт-системах водопостачання. Для досягнення поставленої мети потрібно виконати ряд завдань, зокрема:

- Описати предметну область смарт-систем водопостачання та провести бібліометричний аналіз публікацій за темою.
- Проаналізувати та систематизувати існуючі апаратні методи виявлення витоків води для потреб смарт-систем.
- Дослідити вбудовані технології виявлення витоків води, що застосовуються в смарт-системах водопостачання.
- Вивчити та класифікувати програмні методи виявлення витоків води, включаючи підходи на основі штучного інтелекту.
- Оцінити ефективність та застосовність різних методів виявлення витоків у контексті смарт-систем водопостачання.

**Практичне значення одержаних результатів.** Результати кваліфікаційної роботи мають практичну цінність, сприяючи розробці рекомендацій для операторів водоканалів щодо вибору та імплементації технологій, які не лише зменшать обсяги втраченої води, а й підвищать надійність, стійкість та економічну ефективність функціонування всієї системи водопостачання, що є особливо важливим для України в умовах післявоєнного відновлення та модернізації інфраструктури.

## **РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ ОБЛАСТІ СМАРТ ВОДОПОСТАЧАННЯ**

### **1.1 Опис предметної області смарт водопостачання**

Втрати води в системах водопостачання, особливо через витоки в магістральних трубопроводах, становлять серйозну глобальну проблему, що є критично актуальною для смарт систем водопостачання. Найбільша частка неврахованої води втрачається саме через ці витоки, які можуть також виникати на з'єднаннях, клапанах, гідрантах та підключеннях до споживачів до лічильника.

Актуальність для смарт систем полягає в тому, що ці системи мають потенціал значно знизити такі втрати за допомогою інтелектуального моніторингу та прогнозування. Чинники, що призводять до витоків, такі як матеріал, вік, склад і методи з'єднання труб, а також зовнішні умови (тип ґрунту, вібрації транспорту, морозні навантаження [1]), можуть бути виявлені та проаналізовані за допомогою сенсорів та алгоритмів машинного навчання. Крім того, параметри води, такі як швидкість, тиск і температура, є важливими факторами, що впливають на витоки (наприклад, підвищений тиск збільшує розширення тріщин, а температурні коливання спричиняють розриви). Смарт системи, використовуючи датчики та аналітику даних, здатні оперативно виявляти навіть повільні витоки, які залишаються непоміченими протягом тривалого часу, дозволяючи своєчасно реагувати та запобігати значним втратам води. Це підкреслює необхідність інтеграції передових технологій для підвищення ефективності та стійкості міського водопостачання.

Зазвичай від 20 до 30% води в системах водопостачання втрачається до того, як вона досягне споживачів, а в деяких регіонах з застарілою інфраструктурою цей відсоток може досягати 50% [2]. Ці втрати потрапляють до категорії води, яка не приносить доходу (NRW) – це вода, яка була

вироблена, але не досягла споживача через витоки, крадіжки або неточності в обліку. NRW є значною неефективністю, яка збільшує навантаження на джерела прісної води, як от річки, озера та водоносні шари, які вже перебувають під значним тиском через надмірний забір, зростання населення та зміни клімату. Надмірний забір води порушує екосистеми, знижує рівень води в підземних водах та виснажує важливі резерви, зокрема, водоносні горизонти, які повільно відновлюються, загрожуючи біорізноманіттю та функціям екосистем [3].

Втрати води можуть призвести до серйозних економічних наслідків, наприклад, витрати на ремонт та неотриману воду. Соціальні наслідки також можуть виникнути через незручності для споживачів, викликані низьким тиском, перервами водопостачання та ризиками для здоров'я. Окрім безпосередніх економічних і соціальних ефектів, втрати води можуть мати значні екологічні наслідки, зокрема виснаження цінних водних ресурсів, особливо в регіонах, що стикаються з нестачею води. Очищення води та її розподіл є енергозатратними процесами. Коли виникають витоки, необхідно витратити додаткову енергію для очищення, перекачування та розподілу додаткової води, щоб компенсувати втрати [4].

Ця неефективність не лише витрачає енергію, але й збільшує загальний вуглецевий слід водопостачальних компаній, оскільки для доставки тієї ж кількості води споживається більше енергії [5]. Крім того, ерозія ґрунту та деградація інфраструктури часто спостерігаються як вторинні ефекти постійних витоків води. Надмірні витоки можуть збільшити вологість ґрунтів, дестабілізуючи фундамент та сприяючи осіданню та погіршенню доріг і будівель [6]. Крім того, втрата питної води з пресованих систем збільшує ризик потрапляння забруднювачів у водопостачання через негативні зони тиску навколо витоків [7]. Ця проблема особливо актуальна для старих або погано підтримуваних водопостачальних мереж, що створює ризик для громадського здоров'я, забруднюючи питну воду патогенами або хімічними забруднювачами.

Щоб мінімізувати фінансові, соціальні та екологічні наслідки втрат води, впродовж багатьох років було розроблено різні методи виявлення та управління витокami води [8]. До перших методів належать:

- акустичний моніторинг [9];
- неакустичні методи [10].

З розвитком інформаційних технологій з'явилися методи інспекції трубопроводів із використанням внутрішніх перевірок [11]. Прогрес у сфері програмного забезпечення та вимірювальних інструментів надав водопостачальним компаніям можливість легко розраховувати водний баланс [12] та застосовувати статистичний аналіз для прогнозування витоків [13]. Однак ці методи є трудомісткими, їм складно точно локалізувати витoki, і вони не можуть передбачати проблеми, пов'язані з водопостачанням. Як наслідок, вони не завжди здатні запобігти потенційним катастрофічним пошкодженням.

Останні досягнення у сфері смарт технологій, що охоплюють моніторинг, передачу та аналіз даних, сприяли розробці інноваційних методів виявлення витоків води [14]. Тому доцільно провести всебічний аналіз сучасних методів і технологій виявлення витоків води, дослідити основні переваги та обмеження кожного підходу. Включення бібліометричного аналізу до дослідження дає змогу ефективно оцінити загальні наукові тенденції та виявити зв'язки між відповідними дослідницькими установами. В процесі дослідження доцільно використати бібліометричний аналіз для характеристики наукових статей у базі даних Scopus, що дає можливість мінімізувати суб'єктивні упередження [15]. При цьому потрібно провести аналіз загальних тенденцій у сфері методів виявлення витоків води, оцінити існуючі методи та виявити наукові прогалини та перспективи для вдосконалення точності, ефективності та економічності систем виявлення витоків води. Крім того, доцільно розглянути можливість інтеграції смарт технологій у процес виявлення витоків, надаючи уявлення про те, як ці технології можуть допомогти подолати обмеження традиційних методів.

## 1.2 Методологія дослідження та збір даних

В процесі дослідження застосуємо багатовимірний бібліометричний аналіз для всебічного вивчення методів виявлення витоків води в смарт системах водопостачання. Аналіз охоплює широкий спектр публікацій, зокрема, наукові статті, матеріали конференцій, звіти тощо, з метою глибшого розуміння цієї галузі. При огляді проводитимемо аналіз наукових публікацій за два десятиліття. При цьому будемо враховувати географічний вимір, щоб картографувати глобальний розподіл наукових досліджень у цій сфері [15]. Важливими аспектами даних наукових розвідок є визначення установ, які активно займаються дослідженнями з виявлення витоків води, а також ідентифікація провідних науковців, що роблять значний внесок у літературу в цій галузі. Доцільно додатково проаналізувати ключові наукові журнали, які є основними платформами для поширення знань у цій галузі. Такий комплексний підхід спрямований на отримання цінних висновків щодо еволюції досліджень із виявлення витоків води в смарт системах, сприяючи загальному розумінню цього важливого напрямку.

У межах бібліометричного аналізу [16] щодо виявлення втрат в смарт системах водопостачання дані були зібрані з бази Scopus за період із двохтисячного року. Пошук здійснювався за ключовими словами:

- «water»;
- «distribution systems»
- «leak detection»;
- «leakage detection».

У результаті було отримано понад шістсот документів. Далі вони були класифіковані за різними типами документів. Така категоризація дала змогу всебічно оцінити науковий внесок у дослідницькій галузі виявлення втрат в смарт системах водопостачання. У таблиці 1.1 подано розподіл типів документів та їхні відповідні відсоткові значення.

Таблиця 1.1 – Розподіл типів документів щодо методів виявлення витоків води [15]

| Тип документів     | Кількість | Відсоток (%) |
|--------------------|-----------|--------------|
| Коротке опитування | 1         | 0.2          |
| Огляд              | 18        | 3            |
| Огляд конференції  | 7         | 1            |
| Примітки           | 5         | 1            |
| Папір даних        | 1         | 0.2          |
| Розділ книги       | 12        | 2            |
| Стаття             | 298       | 48           |
| Тези конференцій   | 284       | 45           |

Категорії, частка яких була менш ніж один відсоток, не вважалися статистично репрезентативними та були виключені зі звіту [15]. Також було видалено дублікати та неангломовні публікації. Після фільтрації були відібрані шістсот статей для бібліометричного аналізу та систематичного огляду.

### 1.3 Результати бібліометричного аналізу публікацій щодо смарт систем водопостачання

Розуміння глобального стану досліджень щодо виявлення витоків води є ключовим для оцінки розвитку цієї сфери, визначення найбільш значущих внесків, а також ідентифікації регіонів або установ, що очолюють інновації. Визначаючи тенденції та прогалини у дослідженнях, відповідальні особи можуть ухвалювати обґрунтовані рішення щодо розподілу ресурсів та пріоритетних напрямів для майбутніх досліджень і технологічних інвестицій.

Глобальний науковий внесок у дослідження з виявлення витоків води демонструє значне зростання з двохтисячного року, особливо за останнє десятиліття [15]. На рисунку 1.1 показано коливання кількості щорічних

публікацій, із поступовим зростанням, що розпочалося у дві тисячі дев'ятому році. Це свідчить про зростаючу обізнаність щодо проблем водорозподільних систем та інноваційних методів виявлення витоків.

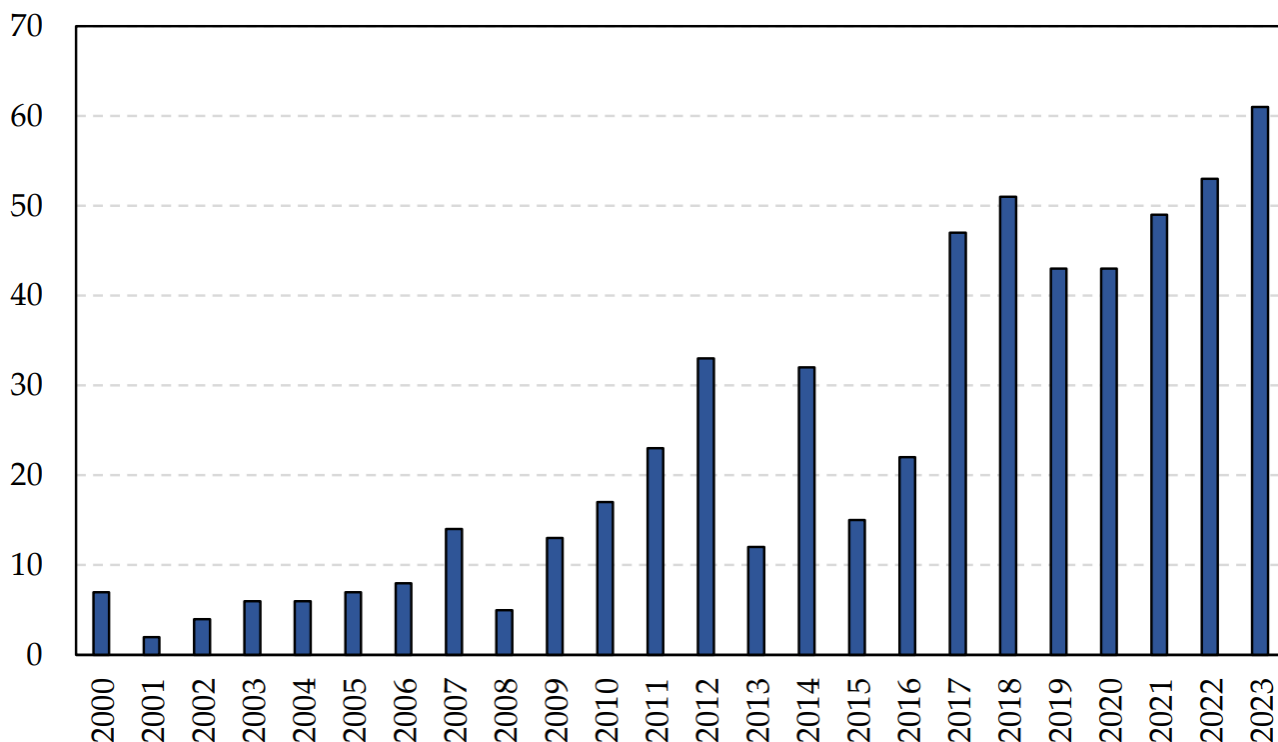


Рисунок 1.1 – Тенденції публікацій щодо методів виявлення витоків води [16]

Сплеск наукових публікацій у цей період корелює зі зростанням глобальних ініціатив зі сталого використання водних ресурсів [15], розвитком сенсорних технологій, а також активним застосуванням методів машинного навчання та штучного інтелекту для виявлення та прогнозування витоків.

Важливо дослідити фактори, що спричинили помітні сплески кількості публікацій у певні роки. Ці піки збіглися з періодом підвищеної глобальної уваги до стійкості інфраструктури, що було зумовлено великими ініціативами, зокрема Цілями сталого розвитку (SDG) ООН, особливо SDG 6, яка стосується чистої води та санітарії [15]. Прогресивний характер тенденції публікацій відображає зростаючу складність технологій виявлення витоків, які еволюціонували від традиційних апаратних методів до інтеграції смарт мереж водопостачання. Стабільне зростання кількості наукових досліджень



підкреслює критичну необхідність вирішення проблеми витоків у застарілій інфраструктурі.

Ключові слова є ефективним засобом для передачі основного дослідницького напрямку. Вони визначають різні підгалузі досліджень у певній сфері [16]. За допомогою VOSviewer [15] було створено карту ключових слів авторів, використовуючи метод дробного підрахунку (див. рисунок 1.2).

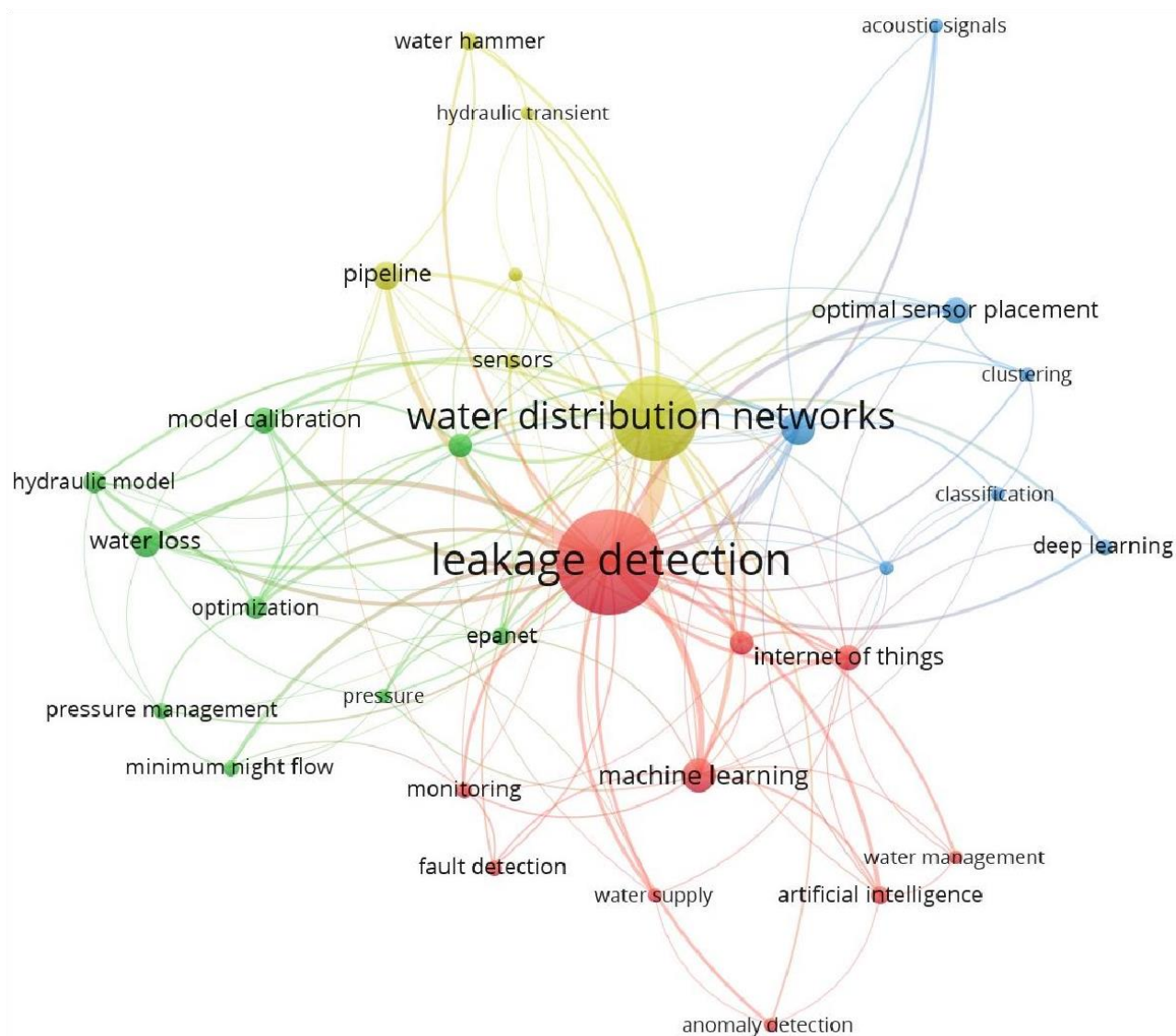


Рисунок 1.2 – Візуалізаційна карта ключових слів [15]

Для об'єднання ключових слів із однаковими семантичними значеннями застосовано тезаурус-файл [15]. Мінімальна кількість повторень ключового слова була встановлена на рівні п'яти. Із понад тисячу ключових слів, тридцять

два відповідали цим критеріям. На основі дослідження співзустрічей ключових було сформовано чотири кластери слів (див. рисунок 1.3).



Рисунок 1.3 – Кластери на основі дослідження співзустрічей ключових слів

Візуалізаційна карта дала можливість ідентифікувати чотири кластери методів виявлення витоків води:

- Кластер А – охоплює методи, засновані на апаратних засобах.
- Кластер В – об’єднує методи локалізації витоків.
- Кластер С – об’єднує методи, засновані на програмному забезпеченні.
- Кластер D – містить методи, що базуються на смарт моніторингу.

На основі визначених кластерів було проведено систематичний огляд методів виявлення витоків, що поєднує:

- апаратні методи;
- методи на основі програмного забезпечення;

– смарт мережі водопостачання.

Апаратні методи можуть не тільки виявляти витoki, але й локалізувати їх, тому кластер А та кластер В були об'єднані для детального аналізу.

#### **1.4 Висновок до першого розділу**

В першому розділі кваліфікаційної роботи описано предметну область смарт водопостачання. Розглянута методологія дослідження та процес збору даних. Подано безумовати бібліометричного аналізу публікацій щодо смарт систем водопостачання.

## **РОЗДІЛ 2. АНАЛІЗ МЕТОДІВ ВИЯВЛЕННЯ ВИТОКІВ ВОДИ ДЛЯ ПОТРЕБ СМАРТ СИСТЕМ ВОДОПОСТАЧАННЯ**

### **2.1 Апаратні методи виявлення витоків води для потреб смарт систем водопостачання**

Методи виявлення витоків води на основі апаратних засобів суттєво еволюціонували впродовж останнього періоду часу, пропонуючи різноманітні рішення для боротьби з цією проблемою. Огляд цих методів дає змогу оцінити їх переваги та недоліки, а також визначити можливості для вдосконалення.

Неакустичні методи є важливою частиною апаратного підходу до виявлення витоків. До них належать технології візуального обстеження, інжекція газу, термографія, георадар (GPR) та методи негативних хвиль тиску.

Візуальне обстеження є традиційним підходом, що значною мірою залежить від досвіду інспектора [17]. Попри доступність цього методу, його суб'єктивність та обмежена зона охоплення залишаються основними викликами. Використання навчених собак для виявлення витоків через їхню здатність відчувати специфічні запахи витоків є перспективним напрямом [18]. Проте для ефективного впровадження цього підходу необхідні стандартизовані протоколи навчання та оцінка надійності в різних умовах.

Метод інжекції газу використовується для виявлення витоків води. Він передбачає введення нетоксичного газу, який є нерозчинним у воді та легшим за повітря, у певну ізольовану ділянку водопровідної труби [19].

Термографія ґрунтується на виявленні теплових аномалій у ґрунті біля пошкоджених труб, які утворюються внаслідок витоків води [20]. При цьому:

- Виявлення теплових аномалій виконується за допомогою інфрачервоних камер, встановлених на автомобілях, літаках або використовуваних вручну [21].

- Метод дає можливість обстежувати великі площі без необхідності розкопок [22].

– Проте термографія є чутливою до зовнішніх факторів, як от сонячне випромінювання, швидкість вітру та вологість ґрунту, що може впливати на точність вимірювань.

Георадар (GPR) є неруйнівним геофізичним методом, який застосовується для виявлення витоків води [23]. Додаткова складність – висока ймовірність хибних спрацьовувань через металеві предмети або інші природні аномалії в ґрунті, що може знизити надійність методу [22].

Передача вхідного перехідного сигналу через систему викликає відбиття від будь-яких аномалій, включаючи витoki, блокування або нерівності поверхні [24]. Зокрема, наявність витoku спричиняє підвищення рівня загасання або створює відбиття в тисковому графіку перехідного сигналу. Індукування гідравлічних перехідних хвиль, часто за допомогою гідроудару, стало загальноприйнятим методом [25].

Місцезнаходження витoku визначається за часом прибуття негативної хвилі, що рухається з відомою швидкістю, до кожного давача тиску, а величина перехідної хвилі дає можливість оцінити розмір пошкодження. Метод, заснований на перехідних процесах, має декілька переваг:

- неінвазивність;
- економічна ефективність;
- широкий діапазон застосування [26].

На сьогоднішній день стратегії виявлення витоків на основі перехідних сигналів поділяються на два основні напрями:

- методи у часовій області [27];
- методи у частотній області, які можуть бути отримані з часових даних за допомогою швидкого перетворення Фур'є або вейвлет-перетворень [28].

Попри свої переваги, метод виявлення витоків на основі перехідних процесів має певні обмеження. Одним із головних недоліків є необхідність дотримання специфічних граничних умов і характеристик сигналу, які можуть бути не застосовними до всіх трубопровідних систем. Крім того, точність оцінки розміру і місця витoku може бути знижена через складнощі, що

виникають у багатокомпонентних трубопровідних мережах. Також використання обчислювальних методів, зокрема, швидке перетворення Фур'є та вейвлет-перетворення, для аналізу сигналів вимагає ретельного калібрування та верифікації.

Майбутні дослідження повинні зосередитися на розробці надійніших алгоритмів і моделей, здатних враховувати різні конфігурації трубопроводів. Крім того, інтеграція передових сенсорних технологій і методів об'єднання даних може підвищити точність і надійність виявлення витоків на основі перехідних процесів.

Акустичні методи становлять значну підгрупу апаратних методів виявлення витоків води, що ґрунтуються на аналізі звуку та змін тиску. Коли вода викидається з отвору під високим тиском, вона створює вібрації, які поширюються трубопроводом у вигляді структурного шуму. Цей акустичний сигнал передається через сталевий стрижень слухової палички і стає чутним через навушник [17]. Спочатку цей метод застосовували для металевих трубопроводів діаметром від 75 мм до 250 мм, які працюють під тиском понад 10 м [29]. У середині 1960-х років відбувся розвиток цього підходу завдяки інтеграції звукових підсилювачів, що працюють від батареї, що значно підвищило ефективність виявлення витоків [30].

Вдосконалені ґрунтові мікрофони або геофони, функціонують аналогічно своїм механічним попередникам. Геофони виявляють підземний шум із поверхневих точок, що є особливо корисним у зонах з мінімальною кількістю фітінгів. Відмінною рисою геофонів є їхня здатність виявляти витoki у пластикових трубах, системах із низьким тиском, а також у середовищах із високим рівнем зовнішнього шуму, спричиненого дорожнім рухом, використанням води, ґрунтовими коливаннями чи вітром [15]. Однак цей метод є трудомістким і потребує значного досвіду оператора для ефективного застосування.

Метод кореляції шуму витoku базується на порівнянні шумів, зафіксованих у двох різних точках вимірювання в закопаних трубопроводах. За

умови однакового матеріалу та діаметра труби шум поширюється з постійною швидкістю в обидва боки від місця витіку. Сенсори виявляють сигнали витіку, які бездротово передаються до корелятора. Корелятор застосовує метод взаємної кореляції для точного визначення місця пошкодження.

Ідеальною ситуацією є розташування витіку на рівній відстані від обох сенсорів – у цьому випадку шум виявляється одночасно. Однак у більшості випадків витік розташований асиметрично між точками вимірювання, що призводить до зсуву у часі, який визначається в процесі кореляції [31]. На рисунку 2.1 показано основний принцип цього методу.

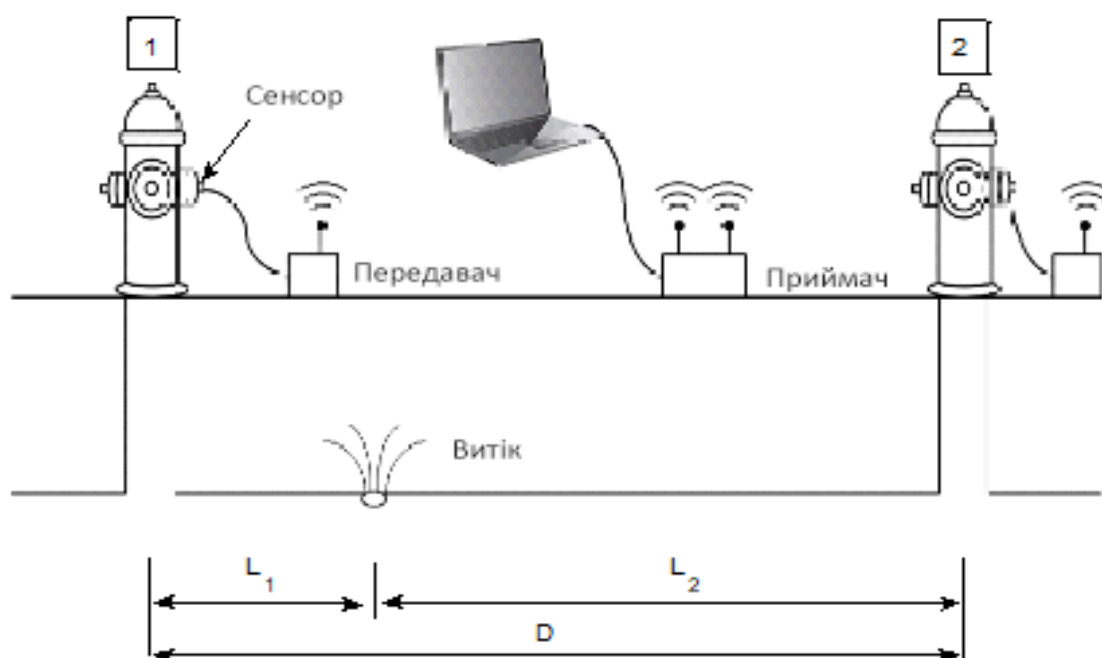


Рисунок 7. Схематичне зображення виявлення витіків за методом взаємної кореляції.

Затримка у часі між двома сигналами визначається розташуванням сенсорів у легкодоступних точках, як от клапани або пожежні гідранти, і може бути обчислена за такою формулою:

$$\Delta T = T_2 - T_1 = \frac{L_2 - L_1}{V} \quad (2.1)$$

Тут  $T_1$  і  $T_2$  позначають часи приходу сигналів 1 і 2 відповідно,  $L_1$  і  $L_2$  – це відстані від витоку до сенсорів 1 і 2, а  $V$  – швидкість поширення звуку в трубі. Відстань від ближчого сенсора до місця витоку можна обчислити, підставивши  $L_2 = D - L_1$  у рівняння (1), де  $D$  – це відстань між двома сенсорами:

$$L_1 = \frac{D - V\Delta T}{2} \quad (2.2)$$

Кореляція шуму витоку вимагає шумового сигналу, який можна генерувати за допомогою акселерометрів та гідрофонів. Акселерометри виявляють прискорення вібрацій, спричинених сигналами витоку, і можуть бути встановлені безпосередньо на трубі або прикріплені до пожежних гідрантів чи підземних клапанів. Ці сенсори є чутливішими до високих частот і добре працюють для металевих труб [31]. З іншого боку, гідрофони виявляють звук, спричинений шумом витоку у водяному ядрі труби, і встановлюються на пожежних гідрантах або клапанах для скидання повітря за допомогою спеціальних фітингів. Ці пристрої ефективніші за акселерометри для низькочастотних сигналів витоків, які зустрічаються в пластикових трубах і трубопроводах великого діаметра [29].

Обмеження методу кореляції шуму витоку при визначенні витоків у пластикових трубопроводах пов'язані з віскоеластичними властивостями пластикових труб, які поглинають звукову енергію і ослаблюють звукові хвилі під час їх поширення по трубі [15]. Хоча метод взаємної кореляції був точним на відстані між сенсорами від 30 до 60 см, він виявився занадто дорогим, трудомістким і мав обмежений діапазон [32]. Цей метод покращується за допомогою шумових логерів, які є компактними пристроями, що складаються з акустичного сенсора, з'єданого з програмованим реєстратором даних і комунікаційним модулем [31]. Логери розміщуються в групах з шести або більше одиниць на сусідніх трубах, з відстанню між ними від 200 до 500 м в металевих мережах і до 80 м у пластикових трубах. Вони призначені для



автоматичного включення в нічний час для моніторингу акустичних вібрацій, які генеруються витоками в водопровідній системі, та надання корисної інформації про місце витоків. Використання постійних акустичних шумових логерів з бездротовою передачею даних значно покращило ефективність виявлення витоків у водорозподільних мережах. Дані, зібрані з цих логерів, можна аналізувати з урахуванням обмежень шумових логерів, включаючи їх залежність від акустичного виявлення та вразливості до зовнішнього шумового втручання. Майбутні дослідження повинні зосередитися на покращенні їхніх можливостей за допомогою передових сенсорних технологій і алгоритмів фільтрації шуму.

## **2.2 Розглянуто вбудовані технології виявлення витоків води в смарт системах водопостачання**

Вбудовані технології для виявлення витоків води в трубопроводах під тиском зазнали значних удосконалень, пропонуючи перспективні альтернативи традиційним методам для ефективнішого та точнішого виявлення витоків. Системи з прив'язкою, як от система Sahara, і системи вільного плавання, як SmartBall, є двома прикладами вбудованих технологій для виявлення витоків води в трубопроводах під тиском. Система Sahara інтегрує гідрофонний акустичний сенсор для вбудованого виявлення витоків [33]. Працюючи в трубопроводі, тиск в якому знаходиться між 0,3 і 13,8 бар, гідрофон рухається по трубопроводу завдяки потоку води, виявляючи шум витoku та маркуючи місце витoku [34]. Хоча ця технологія здатна виявляти витoki, що складають всього 1 л/год і не залежить від матеріалу труби чи типу ґрунту, вона є досить дорогою і може стикатися з проблемами блокування шнура прив'язки різними факторами, такими як тяга, тертя в поворотах і наявність вбудованих клапанів [35].

Натомість системи вільного плавання, наприклад, SmartBall, пропонують інноваційний підхід. SmartBall, оснащений акустичним сенсором,

акселерометром, магнітометром, ультразвуковим передавачем, синхронізованим з GPS, і температурним сенсором, безшумно рухається по трубопроводу за допомогою потоку води [36]. Його сферична форма усуває шумові перешкоди, даючи акустичному сенсору можливість ефективно працювати. SmartBall може обстежувати великі ділянки трубопроводів, до 43 км, за умови відповідних витрат води та тривалості роботи акумулятора [29]. Він здатний виявляти витoki, що складають всього 0,15 галона на годину, незалежно від матеріалу труби, і може виявляти скупчення газу в трубах під тиском. Однак існує ймовірність помилкових спрацьовувань через акустичні характеристики, що нагадують реальні витoki. Цю технологію було протестовано в декількох випадках, зокрема під час успішного обстеження, яке використовувало SmartBall для обстеження 12 км армійських бетонних труб діаметром 1000 мм, виявивши 26 витokів різного розміру з високою точністю визначення місця і запобігаючи тривалим водяним втратам [37].

Застосування волоконно-оптичних сенсорних систем є ще одним вбудованим підходом до виявлення витokів у трубопроводах. Встановлюючи волоконно-оптичні кабелі вздовж труби, можна моніторити зміни в теплових характеристиках навколишнього ґрунту для виявлення та локалізації витokів [38]. Ці системи вимірюють температуру та деформації уздовж кабелю, що дає змогу здійснювати моніторинг у режимі реального часу для запобігання поломкам, вчасного виявлення проблем та полегшення ремонту. Крім того, існуючі волоконно-оптичні телекомунікаційні лінії можуть використовуватись для моніторингу температури та виявлення витokів [39]. Однак ці передові методи потребують подальших досліджень і розробки для усунення потенційних обмежень і оптимізації їхньої ефективності для різних умов і матеріалів трубопроводів.

Майбутні дослідження, що стосуються методів на базі апаратного забезпечення, повинні зосередитися на удосконаленні неакустичних підходів, акустичних інструментів та вбудованих технологій. Постійне вдосконалення методів ін'єкції газу, включаючи дослідження альтернативних трасерів, має

перспективи для покращення здатності до виявлення витоків у різних середовищах. Дослідження алгоритмів ML можуть автоматизувати процеси виявлення, особливо в термографії. Покращення технологій наземного радарного проникнення може підвищити роздільну здатність та глибину для ефективного виявлення витоків під землею.

Оптимізація систем негативного тиску та дослідження смарт клапанів або систем керування можуть підвищити їх ефективність. Щодо акустичних методів, то вдосконалення обробки сигналів та ML може автоматизувати аналіз, а компактні, економічно ефективні логери шуму витoku є важливими для широкого впровадження. Вбудовані технології, зокрема, Sahara, SmartBall і волоконно-оптичні системи, вимагають дослідження підвищеної чутливості, розширення сфери застосування та інноваційних методологій для підвищення точності виявлення. Ці дослідження спрямовані на підвищення точності, ефективності та адаптивності виявлення витоків води у різних інфраструктурах водопостачання.

### **2.3 Досліджено методи виявлення витоків води в смарт системах водопостачання на основі програмного забезпечення**

Методи на основі програмного забезпечення збирають відповідні дані з систем водопостачання, наприклад, витрата води, температура та тиск. Їх можна класифікувати на шість груп:

- варіація витрат;
- дослідження точок тиску;
- водний баланс;
- чисельні методи;
- штучний інтелект;
- розпізнавання шаблонів.

Метод варіації витрат ґрунтується на припущенні, що значне збільшення витрати води на вході чи виході системи водопостачання вказує на наявність

витоку. Тривога про витік спрацьовує, якщо витрата води перевищує заданий поріг впродовж певного часу. Автор [40] запропонував техніку, звану порівнянням розподілів патернів витрат води (CFPD), яка дає можливість виявляти та вимірювати зміни в обсязі поданої води впродовж двох різних часових проміжків. Техніка полягає в побудові одного набору даних проти іншого і виявленні аномалій через найкраще лінійне наближення з нахилом та перехопленням. Постійні зміни, які можуть бути спричинені змінами в погодних умовах або чисельності населення, вказуються нахилом, тоді як непослідовні зміни, що зумовлені збільшенням витоків, вказуються перехопленням. Цей підхід довів свою ефективність у виявленні витоків у системах водопостачання (WDS). Крім того, він може бути використаний для аналізу архівних даних про витрати для виявлення аномалій [41]. Автори [42] створили Cuboid – автоматизований інструмент розпізнавання ознак для аналізу CFPD даних про витрати води в зонах постачання, щоб забезпечити виявлення нових витоків у режимі реального часу або виявлення незареєстрованих змін статусу клапанів. Метод варіації витрат має обмеження через свою чутливість до незначних коливань і потенційних помилкових спрацьовувань через повсякденне використання води. Майбутні дослідження повинні вдосконалити метод, розробивши передові алгоритми для розрізнення справжніх витоків від інших варіацій. Інтеграція додаткових сенсорних технологій, як от давачі тиску та акустичні сенсори, може підвищити надійність, а масштабованість повинна бути основним фокусом, особливо для великих мереж водопостачання.

Метод аналізу точок тиску (PPA) ґрунтується на припущенні, що тиск у трубопроводі зменшується, коли розвивається витік. Для виявлення витоку можна використовувати вимірювання тиску для моніторингу швидкості зміни тиску, виявлення аномально низьких рівнів тиску або порівняння поточних показників тиску з поточною статистичною аналітикою, створеною на основі попередніх даних. Вимірювання тиску проводяться за допомогою давачів, встановлених у трубопроводі, і можуть варіюватися від одного вимірювального пункту до декількох давачів тиску, розподілених уздовж трубопроводу [43].

Тривога про витік спрацьовує, якщо падіння тиску перевищує заданий рівень. Техніка РРА може бути використана для трубопроводів під тиском діаметром від 75 до 1000 мм і не залежить від матеріалу труб чи властивостей рідини. Використання цього методу для моніторингу тиску в мережі має переваги з точки зору простоти та вартості. Однак він не здатний виявляти незначні витіки, оскільки вони не мають суттєвого впливу на тиск. Крім того, падіння тиску в мережі може бути спричинене іншими подіями, крім витоків, що може призвести до помилкових спрацьовувань техніки РРА.

Метод водного балансу, масового балансу або водного аудиту є найбільш поширеною технікою для кількісного визначення загальних водяних втрат і витоків у мережі. Цей підхід ґрунтується на принципі збереження маси, який стверджує, що кількість рідини, що потрапляє в секцію труби, повинна або залишатися в секції, або виходити з неї. Для виявлення витіку метод водного балансу порівнює кількість води, введену в мережу, з сумою води, що споживається або використовується, і будь-яка значна різниця вказує на наявність витіку за межами встановленого рівня допуску. Точність техніки масового балансу залежить від точних вимірювань маси, що надходить в трубопровід та виходить з нього [44]. Основним обмеженням техніки водного аудиту є її залежність від припущення про сталий стан. Це означає, що обсяги, що балансуються, повинні бути розраховані за довший проміжок часу, щоб уникнути помилкових спрацьовувань. Крім того, хоча метод водного балансу є ефективним для кількісного визначення загальних водяних втрат, він обмежений у точному визначенні місць витоків у мережі. Тому часто необхідно доповнювати цей підхід іншими активними методами виявлення витоків.

Чисельні методи моделювання для виявлення витоків води в основному використовують традиційний підхід до гідравлічного моделювання, який застосовується через спеціалізовані програмні інструменти, та методи, засновані на транзитних подіях. Гідравлічне моделювання є ще одним інструментом на основі програмного забезпечення для моніторингу та управління мережами водопостачання як у поточний час, так і в майбутньому.

Ця техніка використовується для передбачення проблем у планованих мережах, проектування ефективних втручань і для експлуатації та управління смарт системами водопостачання.

Гідравлічне моделювання поєднує організацію даних у ієрархічну структуру та калібрування моделі до того, як вона наблизиться до реальності. Однак калібрування моделі залишається складною проблемою [45]. Процес калібрування має на меті зменшити розбіжності між результатами моделі та вимірними значеннями шляхом коригування параметрів моделі, зокрема, шорсткість, споживання води та втрати води. Генетичний алгоритм є загальноновживаним методом для калібрування гідравлічних моделей [46].

Точність гідравлічної моделі може залежати від різних факторів, зокрема, якість використовуваної бази даних (наприклад, топографія, діаметр та довжина труб), невизначеність стану клапанів і точність вимірювальних систем (як от давачі та реєстратори даних). Гідравлічна модель може оцінити кількість витоків у конкретних ділянках, зменшуючи різницю між вимірними та чисельно оціненими тиском і витратами [47]. Крім того, вона може служити різним цілям для управління витокami, на кшталт моделювання витоків як залежного від тиску попиту [48] і створення планів управління тиском для контролю витоків. Оскільки гідравлічне моделювання продовжує відігравати важливу роль в управлінні водними мережами, майбутні дослідження повинні зосередитися на вдосконаленні технік калібрування моделей, покращенні точності даних і розробці інноваційних стратегій для більш проактивного та точного управління мережами водопостачання.

Інверсний транзитний аналіз (ІТА) є складним методом, який використовується для виявлення витоків у системах водопостачання шляхом аналізу транзитних тисків, що поширюються через трубопровід через порушення, зокрема, закриття клапанів або поломки насосів. Цей метод працює шляхом порівняння вимірних даних про транзитний тиск з даними, що симулюються за допомогою математичної моделі системи. Метою є мінімізація різниці між реальними та симульованими даними, розглядаючи проблему

виявлення витоків як обернену задачу, що розв'язується за допомогою оптимізаційних алгоритмів. ІТА особливо успішно використовувався для виявлення витоків, використовуючи чутливість тискових хвиль до аномалій, на кшталт витоків в трубопроводі [49].

Автори [50] застосували ІТА в контрольованих лабораторних умовах і напів-польових середовищах, продемонструвавши його ефективність у визначенні місць та розмірів витоків, коли фізичні та гідравлічні характеристики системи добре відомі. Їхні результати показали, що точність ІТА значною мірою залежить від точної моделі системи, що робить її дуже придатною для контрольованих умов. А вітори [51] далі досліджували ІТА, застосували його до систем поліетиленових труб в Імперіальному коледжі Лондона. Результати їхнього дослідження підтвердили, що ІТА може успішно виявляти та локалізувати витоків, якщо межі системи та фізичні характеристики трубопроводу добре зрозумілі та контролюються. Однак вони також підкреслили проблеми, пов'язані з розширенням застосування ІТА для реальних умов, де шум і невизначеність системи можуть впливати на точність виявлення витоків.

Для вирішення обчислювальних проблем та проблем шуму в ІТА останні дослідження включають використання передових методів оптимізації. Автори [52] запропонували структуру ІТА на основі генетичного алгоритму, яка значно зменшила час обчислень і покращила точність локалізації витоків, навіть у системах, що зазнають впливу шуму. Незважаючи на свої переваги, ІТА має обмеження при застосуванні до великих систем з складними топологіями, шумовими перешкодами та невизначеними граничними умовами. Майбутні дослідження мають на меті покращити надійність ІТА через інтеграцію передових методів обробки сигналів, машинного навчання та гібридних підходів, що поєднують ІТА з іншими методами виявлення витоків, такими як акустичні давачі або волоконно-оптичні технології [53].

Мащини підтримки векторів (SVM) нещодавно стали цінним інструментом для виявлення витоків води, надаючи потужні можливості для

обробки складних, багатовимірних даних з трубопровідних систем. Основний механізм роботи SVM полягає у пошуку оптимальної гіперплощини, яка відокремлює різні класи, як от «витік» та «немає витоків», на основі вхідних ознак, зокрема, тиск, потік та акустичні сигнали. Ефективність SVM у виявленні витоків зумовлена її здатністю працювати як з лінійними, так і з нелінійними взаємозв'язками за допомогою «ядерного трюку», що проєктує дані в простір вищої розмірності, де вони стають лінійно роздільними. Ця гнучкість дає змогу SVM адаптуватися до складних, реальних водорозподільчих систем, де виявлення витоків може бути складним через зовнішній шум, змінність умов експлуатації та наявність сигналів, що не є витоків [54]. SVM було використано для виявлення витоків у змодельованій водопровідній мережі, аналізуючи дані тиску з різних з'єднань. Система використовувала дані від сенсорів у водорозподільчій мережі, і алгоритм SVM був натренований за допомогою ядра радіально-базисної функції (RBF) для класифікації та виявлення витоків у мережі. Система досягла помилки кореня середньоквадратичного відхилення (RMSE) «0,06785» для прогнозування розміру витоків та «0,1382» для прогнозування місця витоків, що свідчить про високий рівень точності [55]. Інше дослідження було зосереджене на застосуванні однотипного SVM (OCSVM) для виявлення аномалій у водорозподільчих системах. OCSVM використовувався для виявлення витоків у холодному кліматі за допомогою сенсора, встановленого на гідранті. Система була розроблена для мінімально інвазивного моніторингу, і результати показали «97%» точність у класифікації подій витоків за акустичними даними [56].

Основною перевагою використання SVM для виявлення витоків води є її сильні можливості класифікації, навіть коли дані зашумлені або коли взаємозв'язки між змінними є нелінійними. Однак обмеження SVM включають її залежність від високоякісних навчальних даних і чутливість до налаштування параметрів, особливо при виборі ядра, що може впливати на ефективність моделі. Крім того, SVM може бути обчислювально інтенсивним при роботі з



великими наборами даних, що може обмежити застосування в режимі реального часу для великих водопровідних мереж [57]. Майбутні покращення систем на основі SVM для виявлення витоків включають гібридизацію SVM з іншими алгоритмами, такими як випадкові ліси або нейронні мережі, для підвищення надійності та точності. Крім того, інтеграція технологій Інтернету речей (IoT) та передових сенсорів може забезпечити комплексніше збирання даних, що покращить точність моделей SVM у виявленні та локалізації витоків.

Техніки глибинного навчання, зокрема штучні нейронні мережі (ШНМ) та згорткові нейронні мережі (ЗНМ), стали корисними інструментами для покращення виявлення та локалізації витоків води в розподільчих мережах [58]. ШНМ нещодавно були використані для виявлення та локалізації витоків у водопровідних мережах [59]. ШНМ встановлюють зв'язок між вхідними та вихідними даними. У випадку водопостачальних мереж вхідні дані характеризують нормальні та аномальні стани системи, з витокami та без них. ШНМ виступає як класифікатор, що оцінює поточний стан системи та ідентифікує витoki на основі доступних даних [60]. Метод ШНМ був використаний для виявлення та локалізації витоків на основі даних потоку та тиску. Він ефективно виявляв прориви у реальному випадку на понад ста сорока зонах у Великій Британії [61]. Крім того, модель ШНМ можна інтегрувати з Геоінформаційними системами (ГІС) для оцінки витоків води та пріоритизації заміни трубопроводів [13]. Автори [62] використали дані, зібрані впродовж чотирнадцяти років, для прогнозування відмов труб у водопостачальній системі міста Ватрелос у Франції за допомогою методу ШНМ. Модель також визначила оптимальний час для реконструкції труб у системі [57]. Хоча ШНМ продемонстрували значний потенціал у виявленні витоків, існують певні обмеження. До них належать необхідність наявності великих високоякісних навчальних наборів даних, проблеми з інтерпретованістю моделі та вимоги до обчислювальних ресурсів. Для розвитку майбутніх досліджень у цій галузі необхідно зосередитися на вдосконаленні стратегій навчання, покращенні надійності моделей в умовах різних

експлуатаційних ситуацій та дослідженні методів підвищення інтерпретованості моделей і співпраці людини та ШІ в управлінні витокami.

ЗНМ особливо корисні для аналізу складних наборів даних, наприклад, акустичні емісії та карти залишкових тисків. На відміну від ШНМ, які працюють з структурованими числовими вхідними даними, ЗНМ обробляють складніші представлення даних, що робить їх ідеальними для застосувань, як от виявлення витоків на основі акустичних сигналів. Декілька досліджень використовували ЗНМ для перетворення карт тиску в зображення, що дає моделям можливість точно ідентифікувати витoki, виявляючи незначні зміни в тиску або акустичних патернах. Наприклад, одне дослідження використовувало ЗНМ для аналізу акустичних хвиль, зібраних з смарт мережі водопостачання в Аделаїді, Австралія, досягнувши точності понад 90% у відокремленні витоків від фонових шумів [59]. Дослідження [63] вивчало глибинне навчання для локалізації витоків за допомогою ЗНМ. У дослідженні була запропонована нова методика, що перетворює карти залишкових тисків у зображення, і застосування ЗНМ для ідентифікації місць витоків з високою точністю. Метод використав дані тиску з ділянки вимірювання в районі в Ханой, В'єтнам, і продемонстрував хорошу узагальненість, застосовуючи байєсівське мислення для обробки невизначеності та шуму. Дослідження показало значну точність класифікації, що демонструє, як ЗНМ можуть обробляти дані тиску для виявлення витоків у реальних умовах. Автори [64] зосередились на використанні ЗНМ для виявлення витоків на основі реальних звуків витоків, зібраних з реальних трубопроводів. У дослідженні використовувались рекурентні графіки для перетворення акустичних даних часового ряду в 2D зображення, що можуть бути оброблені моделлю ЗНМ. Модель досягла точності виявлення понад 80% у 15 з 20 випадків витоків, що продемонструвало, що акустичні моделі на основі ЗНМ можуть ефективно відрізняти звуки витоків від фонових шумів. Цей метод був перевірений на польових даних, що робить його особливо цінним для раннього виявлення витоків у практичних умовах.

Комбінація ШНМ та ЗНМ дала змогу здійснювати автоматизоване виявлення витоків в режимі реального часу, що значно зменшує потребу в ручних перевірках та мінімізує втрати води. Однак залишаються виклики, включаючи необхідність великих високоякісних наборів даних для навчання цих моделей та обчислювальні ресурси, необхідні для їх впровадження в реальних системах. Майбутні дослідження повинні зосередитися на покращенні масштабованості та ефективності цих моделей, зробивши їх стійкішими до різноманітних експлуатаційних умов, а також на удосконаленні їх інтеграції в системи «розумного» управління водопостачанням для оптимізованого виявлення витоків та ефективності мережі [8].

## **2.4 Висновок до другого розділу**

В другому розділі кваліфікаційної роботи було проаналізовано апаратні методи, вбудовані технології та методи на основі програмного забезпечення.

Проведений аналіз демонструє, що методи виявлення витоків води для смарт-систем водопостачання постійно вдосконалюються, охоплюючи як апаратні, так і програмні підходи. Апаратні методи, від візуального обстеження та використання газу до складних акустичних та вбудованих технологій, забезпечують прямий моніторинг, але часто страждають від обмежень, пов'язаних із зовнішніми факторами, високою вартістю, трудомісткістю або чутливістю до матеріалів труб та шуму. Вони є важливими для первинного виявлення та локалізації, проте їхня повна ефективність у великих і складних мережах часто вимагає значних ресурсів і залежить від експертного досвіду.

З іншого боку, програмні методи, включаючи аналіз варіацій витрат, тиску, водного балансу та, особливо, сучасні підходи на основі ШІ, як-от SVM, глибинне навчання, ШНМ, ЗНМ, відкривають нові можливості для автоматизації та підвищення точності. Ці методи дають можливість обробляти великі обсяги даних, виявляти приховані закономірності та прогнозувати витoki з високою ефективністю, навіть у складних нелінійних системах. Проте,

вони вимагають значних обсягів якісних навчальних даних, відповідних обчислювальних ресурсів і ретельного налаштування параметрів. Майбутні дослідження мають зосередитися на гібридизації цих підходів, інтегруючи передові сенсорні технології з потужними алгоритмами ШІ, щоб створити більш надійні, точні та масштабовані рішення для ефективного управління втратами води у смарт-системах водопостачання.

## РОЗДІЛ 3. ОЦІНКА МЕТОДІВ ТА АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ЇХ ДОСЛІДЖЕННЯ

### 3.1 Оцінка методів виявлення витоків

Ефективність методів виявлення витоків можна оцінювати за п'ятьма критеріями:

- Чутливість до витоків – здатність виявляти невеликі витoki.
- Локація витoku – здатність точно визначити місце витoku.
- Моніторинг в режимі реального часу – можливість безперервно контролювати систему водопостачання.
- Помилкові спрацьовування – частота виникнення помилкових спрацьовувань, коли витoki не існують.
- Вартість.

В таблиці 3.1 міститься характеристика ефективності апаратних методів виявлення витоків води, детально описаних у попередньому розділі.

Таблиця 3.1 – Порівняльний аналіз апаратних методів виявлення витоків води [15]

| Категорія    | Методи                  | Точність | Місце витoku | Моніторинг у режимі реального часу | Помилкові тривоги | Вартість |
|--------------|-------------------------|----------|--------------|------------------------------------|-------------------|----------|
| 1            | 2                       | 3        | 4            | 5                                  | 6                 | 7        |
| Неакустичний | Візуальний огляд        | Помірний | Так          | Ні                                 | Низький           | Низький  |
|              | Газовий інжектор        | Високий  | Так          | Ні                                 | Низький           | Високий  |
|              | Термографія             | Середній | Так          | Ні                                 | Середній          | Високий  |
|              | Георадар                | Середній | Так          | Ні                                 | Середній          | Високий  |
|              | Хвилі негативного тиску | Високий  | Так          | Ні                                 | Високий           | Середній |
| Акустичний   | Кореляція шуму          | Середній | Так          | Ні                                 | Середній          | Низький  |
|              | витoku вручну           | Середній | Так          | Так                                | Середній          | Високий  |

Продовження таблиці 3.1

| 1          | 2                          | 3        | 4   | 5   | 6        | 7       |
|------------|----------------------------|----------|-----|-----|----------|---------|
|            | Реєстратори шуму<br>витоку | Середній | Так | Так | Середній | Високий |
| Вбудований | Sahara SmartBall           | Високий  | Так | Ні  | Низький  | Високий |
|            | Оптоволокно                | Високий  | Так | Так | Низький  | Високий |

Неакустичні методи, наприклад, візуальні обстеження та ін'єкція газу, забезпечують високу чутливість і точну локацію витоку, але не мають моніторингу в режимі реального часу, з низькими витратами та випадковими помилковими спрацьовуваннями. Акустичні методи, зокрема, кореляція шуму витоку та логери, пропонують моніторинг в режимі реального часу з середньою чутливістю та рідкісними помилковими спрацьовуваннями.

Неакустичні методи, наприклад, візуальні обстеження та ін'єкція газу, забезпечують високу чутливість і точну локацію витоку, але не мають моніторингу в режимі реального часу, з низькими витратами та випадковими помилковими спрацьовуваннями. Акустичні методи, зокрема, кореляція шуму витоку та логери, пропонують моніторинг в режимі реального часу з середньою чутливістю та рідкісними помилковими спрацьовуваннями. Інлайн-технології, зокрема, Sahara, SmartBall та оптоволокно, демонструють високу чутливість і точне визначення місця витоку, але не забезпечують моніторинг в режимі реального часу та мають високі витрати.

Програмні методи, наприклад, водний баланс, гідравлічне моделювання та штучний інтелект, варіюються за чутливістю, здатністю визначати місце витоку та моніторингу в режимі реального часу, з витратами від низьких до високих.

В таблиці 3.2 подано характеристику ефективності методів виявлення витоків води на основі програмного забезпечення, детально описаних у попередньому розділі.

Таблиця 3.2 – Порівняльний аналіз методів виявлення витоків води на основі програмного забезпечення[15]

| Методи                 | Точність | Місце витоку | Моніторинг у режимі реального часу | Помилкові тривоги | Вартість |
|------------------------|----------|--------------|------------------------------------|-------------------|----------|
| Метод зміни потоку     | Низький  | Ні           | Так                                | Низький           | Низький  |
| Аналіз точки тиску     | Середній | Ні           | Так                                | Середній          | Середній |
| Метод водного балансу  | Низький  | Ні           | Так                                | Низький           | Низький  |
| Чисельні методи        | Середній | Ні           | Так                                | Середній          | Середній |
| Опорні векторні машини | Високий  | Так          | Так                                | Низький           | Середній |
| Глибинне навчання      | Високий  | Так          | Так                                | Низький           | Високий  |

В таблиці 3.3 подано обмеження та потенційні вдосконалення для неакустичних методів виявлення витоків води.

Таблиця 3.3 – Обмеження та необхідні вдосконалення неакустичних методів виявлення витоків води [15]

| Методи           | Обмеження                                                                                                             | Покращення для майбутніх досліджень                                                                                    |
|------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1                | 2                                                                                                                     | 3                                                                                                                      |
| Візуальний огляд | Виявлення лише видимих поверхневих витоків                                                                            | Потрібно розробити додаткові технології для комплекснішої оцінки витоків, окрім виявлення лише витоків поверхневих вод |
| Газовий інжектор | На точність впливають фактори навколишнього середовища, зокрема, вітер, температура та характеристики газорозсіювання | Доопрацювання процесу впорскування газу, включаючи вибір відповідних індикаторних газів                                |
| Термографія      | Недостатній перепад температур                                                                                        | Покращення чутливості для виявлення незначних температурних коливань                                                   |

Продовження таблиці 3.3

| 1                       | 2                                                                      | 3                                                                              |
|-------------------------|------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|
| Георадар                | Труднощі в розрізненні водопровідних труб та інших закопаних об'єктів  | Адаптація до різних типів ґрунту та розрізнення різних підземних характеристик |
| Хвилі негативного тиску | На точність сильно впливає матеріал труби, діаметр і складність мережі | Інтеграція методів аналізу даних, щоб вирішити ці складності                   |

У неакустичних методах візуальні обстеження обмежені лише виявленням видимих витоків води на поверхні, що вказує на необхідність використання додаткових технологій для комплексної оцінки витоків. Точність ін'єкції газу залежить від факторів навколишнього середовища, що вимагає вдосконалення процесу та вибору відповідних газів-слідників. Термографія стикається з труднощами виявлення незначних коливань температури, що вказує на необхідність підвищення чутливості. Радар, що проникає в ґрунт, має проблеми з відмінністю водопроводів від інших похованих об'єктів, що вимагає адаптації до різних типів ґрунту. Точність хвиль негативного тиску залежить від характеристик труб, що свідчить про необхідність інтеграції технік аналізу даних.

В таблиці 3.4 подано обмеження та потенційні вдосконалення для неакустичних методів виявлення витоків води.

Таблиця 3.4 – Обмеження та необхідні вдосконалення акустичних методів виявлення витоків води [15]

| Методи                            | Обмеження                                                          | Покращення для майбутніх досліджень                                                                    |
|-----------------------------------|--------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1                                 | 2                                                                  | 3                                                                                                      |
| Ручні палички для прослуховування | Менш ефективний у великих системах або шумному міському середовищі | Розробка технології фільтрації шуму та автоматизовані механізми виявлення, щоб зменшити помилки людини |



Продовження таблиці 3.4

| 1                       | 2                                                                   | 3                                                                                       |
|-------------------------|---------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|
| Кореляція шуму витоку   | Чутливий до матеріалів трубопроводів, діаметрів і складності мережі | Інтеграція методів калібрування для врахування різноманітних конфігурацій трубопроводів |
| Реєстратори шуму витоку | Перешкоди між сигналами витоку та шумом навколишнього середовища    | Поліпшення чутливості, зосередившись на розширених алгоритмах обробки сигналу           |

Акустичні методи, зокрема, ручні стетоскопи, менш ефективні в великих системах, що вимагає розробки технологій фільтрації шуму. Кореляція шуму витоку чутлива до параметрів трубопроводів, підкреслюючи необхідність інтеграції з методами калібрування.

В таблиці 3.5 подано обмеження та потенційні вдосконалення для вбудованих методів виявлення витоків води.

Таблиця 3.5 – Обмеження та необхідні вдосконалення вбудованих методів виявлення витоків води [15]

| Методи      | Обмеження                                                | Покращення для майбутніх досліджень                                                                     |
|-------------|----------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Сахара      | Потреба у відповідних точках доступу в конвеєрі          | Удосконалення системи, щоб охопити трубопроводи з обмеженим доступом                                    |
| SmartBall   | Труднощі з навігацією складної геометрії трубопроводу    | Покращення адаптивності для трубопроводів, які не підлягають копанню                                    |
| Оптоволокно | На точність впливають матеріали труб і складна геометрія | Оптимізація волоконно-оптичної технології для ширшого діапазону матеріалів і конфігурацій трубопроводів |

Інлайн-технології, наприклад, SmartBall, стикаються з труднощами у визначенні точної локації витоку, що потребує інтеграції алгоритмів обробки даних. Точність оптоволоконних методів залежить від матеріалів труб, що вказує на необхідність оптимізації. В таблиці 3.6 подано обмеження та

потенційні вдосконалення для методів виявлення витоків води на основі програмного забезпечення.

Таблиця 3.6 – Обмеження та необхідні вдосконалення методів виявлення витоків води на основі програмного забезпечення

| Методи                            | Обмеження                                                                       | Покращення для майбутніх досліджень                                                                                      |
|-----------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Метод зміни потоку                | Зміни пов'язані з поведінкою споживачів або попитом на воду, а не з витокami    | Розробка розширених алгоритмів для розрізнення різних причини зміни течії                                                |
| Аналіз точки тиску                | Коливання тиску викликані гідроударом, а не витокami                            | Інтеграція алгоритмів аналізу тиску для врахування перехідних ефектів тиску                                              |
| Метод водного балансу             | Неточності в даних лічильників, очевидні втрати                                 | Поєднання методу з іншими техніками, щоб підвищити точність даних і виявити приховані джерела втрати води                |
| Чисельні методи                   | Калібрування                                                                    | Доповнення моделі адаптивними методами, які можуть інтегрувати дані в режимі реального часу для ефективного калібрування |
| Підтримуйте векторні машини (SVM) | Вимагає мічених навчальних даних, інтенсивних обчислень для великих мереж       | Удосконалення алгоритмів SVM за допомогою неконтрольованого навчання або методів онлайн-навчання                         |
| Глибоке навчання                  | Вимагає великих наборів даних, схильних до переобладнання без відповідних даних | Покращення узагальнення моделі та урізноманітніть дані та параметри                                                      |

Програмні методи, зокрема, наприклад, водний баланс, можуть показувати неточності, що вимагає їх поєднання з іншими методами для покращення точності даних. Гідравлічне моделювання вимагає ефективних методів калібрування, а ефективність штучного інтелекту можна покращити за допомогою різноманітних даних і параметрів. Ці виявлені обмеження надають чіткі напрямки для майбутніх досліджень, спрямованих на вдосконалення та розвиток технологій виявлення витоків води.

### 3.2 Методи смарт водопостачання

Впровадження ІКТ в міські мережі призвело до виникнення концепції «Розумного міста», в якому компоненти інфраструктури стають інтелектуальнішими, взаємопов'язаними та ефективнішими [65]. Після успішного впровадження смарт мереж в електричному секторі [66], водопостачальні компанії були мотивовані прийняти схожий підхід у системах водопостачання (WDS). Це призвело до виникнення концепції смарт мереж водопостачання. Ця концепція базується на оснащенні труб сенсорами, які моніторять їхнє функціонування та стан [67]. Основною метою смарт мережі водопостачання є створення комплексної системи моніторингу, яка інтегрує технології сенсорів, збирання даних, інтерпретацію даних та процеси прийняття рішень для управління активами трубопроводів в режимі реального часу [68]. Концепція та архітектура смарт мережі водопостачання показані на рисунку 3.1.

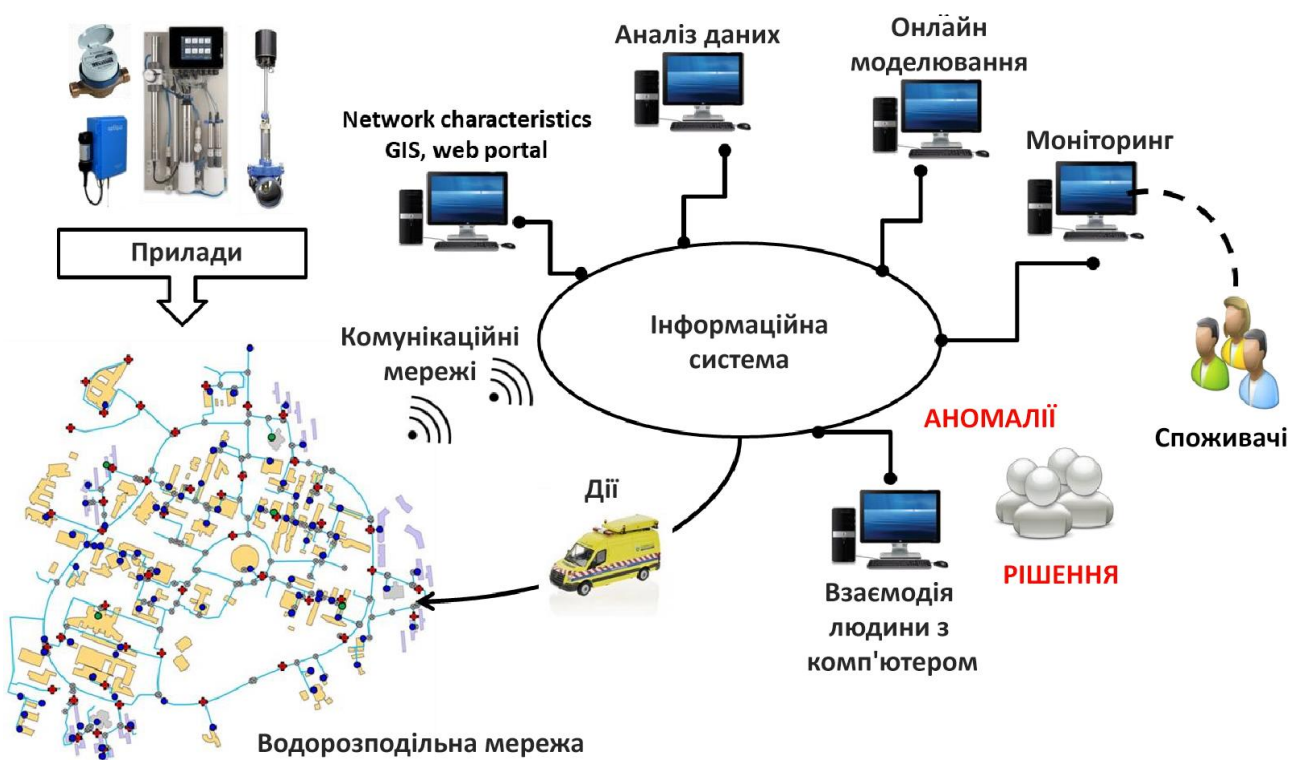


Рисунок 3.1 – Концепція смарт мереж водопостачання [69]

Смарт мережа водопостачання може бути розділена на п'ять окремих шарів, кожен з яких має власний набір обов'язків [70]:

- Фізичний шар – містить всі фізичні компоненти системи водопостачання (WDS), зокрема, труби, клапани, резервуари та насоси.

- Сенсори та управління – використовуються для вимірювання параметрів води, як от потік, тиск і якість, серед інших важливих характеристик.

- Збір та комунікація – це автоматичне та безперервне збирання і передачу вимірюваних даних.

- Управління даними та відображення – вимагає створення бази даних для організації зібраних даних та їх представлення через інструменти візуалізації, наприклад, GIS, а також налаштування системи інформації для клієнтів.

- Об'єднання даних та аналіз – поєднує використання програмного забезпечення для моделювання для вивчення реакцій мережі, застосування передсказувальної аналітики для виявлення подій, виявлення та локалізації витоків, підтримки прийняття рішень тощо. Вся мережа може управлятися віддалено та автоматично через канали зв'язку.

Автори [71] розробили смарт мережу водопостачання, використовуючи експериментальну систему водопостачання під назвою EWDS-TUG, що застосовувала штучних споживачів, сенсори та контрольовані магнітні клапани. Завдяки впровадженню концепції смарт мереж водопостачальні компанії можуть мінімізувати втрати води завдяки постійному та надійному моніторингу водопостачальних мереж [72]. Моніторинг водопостачальних мереж в режимі реального часу пропонує ряд переваг, зокрема покращену видимість мережі, заощадження води та енергії, раннє виявлення неефективностей мережі, зменшення потреби в перевірках на місці та покращення якості послуг для клієнтів.

Популярний спосіб визначення рівня витоків у смарт мережах водопостачання – це аналіз мінімального нічного потоку (MNF) між північню

та четвертою годинами ранку. Цей аналіз зазвичай проводиться між дугою і четвертою годинами ранку, коли попит споживачів і тиск у мережі високі, що робить витoki більш очевидними в зоні з обліком води (DMA) [17]. Щоб створити зону з обліком води (DMA), водопостачальна мережа розподіляється на окремі зони за допомогою закриття клапанів. Обсяг води, що надходить і виходить із зони, вимірюється для визначення кількості витоків. Сигнал тривоги про витік спрацьовує, коли MNF у DMA перевищує поріг, встановлений водопостачальними компаніями. MNF залежить від декількох факторів, зокрема віку і довжини труб, кількості підключень і тиску в мережі.

WSN є застосуванням концепції смарт мереж у водопостачальних мережах. Вона складається з взаємопов'язаних бездротових вузлів, які можуть відчувати, обчислювати і передавати дані бездротовим способом, але також мають вимоги до живлення. У бездротовій мережі для моніторингу трубопроводів сенсорні вузли працюють разом для збору і передачі даних на базову станцію [73]. Однак при впровадженні смарт труб необхідно враховувати певні фактори, зокрема, канал радіопередачі, обмеження за потужністю та пам'яттю, а також ефективні маршрутизаційні протоколи.

«PipeNet» – це система бездротової сенсорної мережі, розроблена для виявлення, локалізації та кількісної оцінки витоків і вибухів у водопровідних трубопроводах [74]. Розробка «PipeNet» поділяється на три етапи. Перший етап стосується перевірки маломасштабного прототипу для оцінки довговічності сенсорів. На другому етапі тестуються та перевіряються передові методи збору та аналізу даних у лабораторних умовах, використовуючи, синхронізований збір даних і акустичне виявлення витоків. Третій і останній етап – це об'єднання перших двох етапів для створення комплексного рішення для моніторингу в режимі реального часу.

Іншим відомим прикладом застосування WSN є проект «Wireless Water Sentinel, WaterWise@SG», який працює в Сінгапурі і відомий своїм комплексним управлінням гідравлічними, акустичними та параметрами якості води. Ця платформа дає змогу застосовувати такі функції, як прогнозування

попиту на воду та гідравлічного стану, виявлення подій, зокрема, вибухи труб, та ідентифікація довгострокових тенденцій за допомогою аналізу даних [75].

Проект «ICT Solutions for Efficient Water Resources Management (ICeWater)» також має на меті покращити стабільність постачання прісної води шляхом використання технології смарт мереж [76]. Система поєднує три шари:

- установку давачів;
- збір і обробку даних;
- взаємодію з користувачами.

Проект «iWIDGET» – це ще один помітний проект смарт води, який надає онлайн-платформу для ефективного управління міськими водними ресурсами через інформаційні та комунікаційні технології, що надає дані про споживання води в режимі майже реального часу та інструменти підтримки процесів прийняття рішень для домогосподарств і водопостачальних компаній [77].

У Франції знаходиться проект «SunRise Smart Water», демонстрація смарт систем водопостачання у рамках європейської ініціативи «SmartWater4Europe». Охоплюючи широкий спектр міських мереж, зокрема водопостачальні системи, Він стикається з проблемами втрат води через різні фактори, зокрема старіння інфраструктури, рух ґрунтів та невраховані обсяги води для специфічних цілей, наприклад, очищення мереж чи будівельні роботи. Для подолання цих проблем використовуються гідравлічні давачі, AMR та інші техніки для вимірювання потоку, тиску та рівнів шуму в трубопроводах і всередині будівель. Комбінація різних методів, включаючи водний баланс, мінімальний нічний потік, акустичні реєстратори витоків, гідравлічне моделювання та методи штучних нейронних мереж, допомогла швидко виявляти декілька витоків і суттєво зменшити кількість некомерційної води [78].

Системи смарт управління водними ресурсами відіграють важливу роль у покращенні виявлення витоків води. Однак вони стикаються з певними викликами, зокрема з високими витратами на впровадження, питаннями кібербезпеки та управління обсягами даних. Гетерогенність існуючої водної інфраструктури, яка часто є застарілою і несумісною з передовими сенсорами

та комунікаційними технологіями, необхідними для смарт моніторингу, є ще одним викликом. Крім того, відсутність стандартизованих протоколів і сумісності посилює складність інтеграції смарт систем.

Ці проблеми необхідно вирішувати, і майбутні дослідження повинні зосереджуватися на декількох напрямках, які потребують вдосконалення. По-перше, покращення інтеграції передових аналітичних методів, машинного навчання та штучного інтелекту може підвищити точність виявлення витоків і полегшити автоматизацію процесів прийняття рішень. Дослідження більш економічних і енергоефективних сенсорів та комунікаційних технологій є важливими для зниження бар'єрів до впровадження рішень для смарт управління водними ресурсами. Крім того, розробка стандартизованих протоколів кібербезпеки та заходів шифрування даних є важливою для захисту цих систем від кіберзагроз. Ініціативи, що сприяють створенню універсальних комунікаційних протоколів, можуть покращити сумісність, що полегшить безшовну інтеграцію різноманітних технологій у водних мережах.

### **3.3 Аналіз результатів дослідження методів виявлення витоків у системах смарт водопостачання**

Результати аналізу досліджень підкреслюють як досягнення, так і поточні виклики в технологіях виявлення витоків води, наголошуючи на необхідності постійних інновацій. Традиційні методи, наприклад, акустичний моніторинг та ручні обстеження, залишаються корисними для маломасштабних операцій завдяки їх відносно низьким витратам і простоті впровадження. Однак ці методи мають суттєві обмеження в режимі реального часу, точності в складних мережах і залежності від навколишніх умов. Наприклад, дослідження [79] показали, що акустичні методи переважно ефективні для металевих трубопроводів, але мають труднощі з виявленням витоків у пластикових трубах через властивості звукопоглинання таких матеріалів. Крім того, традиційні методи вимагають великої кількості робочої сили і схильні до помилок

операторів, тоді як зовнішній шум може призвести до хибних спрацьовувань або пропущених витоків.

Екологічні фактори, зокрема, умови ґрунту, коливання температури та зовнішні вібрації від міської інфраструктури, ще більше ускладнюють використання неінвазивних методів, як от термографія та радар з проникненням у землю. Ці змінні навколишнього середовища можуть давати оманливі сигнали, що призводить до хибних спрацьовувань або пропущених витоків.

У порівнянні з цим сучасні технології, зокрема інтегровані системи, наприклад, SmartBall і оптоволоконні сенсори, пропонують високу точність і безперервний моніторинг, що робить їх ідеальними для великих або високонапірних мереж. Подібно до висновків [34], які також підкреслювали переваги інтегрованих технологій у певних контекстах, що високі витрати та складність обмежують їх широке впровадження, особливо в країнах, що розвиваються, де фінансові обмеження та відсутність інфраструктури становлять значні проблеми. Крім того, потреба в кваліфікованих операторах для управління цими технологіями створює бар'єри для регіонів з обмеженим технічним досвідом.

Застосування ШІ та машинного навчання ML у виявленні витоків води відкриває нові можливості для підвищення точності та автоматизації. Техніки, як от SVM та моделі глибинного навчання, дають можливість аналізувати великі набори даних, що сприяє точнішому виявленню витоків та їх локалізації. Подібні дослідження [80], підтвердили зростаюче значення систем на основі ШІ, однак ці технології потребують доступу до високоякісних мічених наборів даних, які можуть бути недоступними в багатьох регіонах. Крім того, обчислювальні вимоги цих методів можуть обмежувати їх використання в режимі реального часу, особливо для комунальних служб з обмеженими обчислювальними потужностями. Майбутні дослідження повинні зосередитися на оптимізації моделей ШІ для ефективної роботи з меншими наборами даних та розробці алгоритмів реального часу, що знижують обчислювальне навантаження.



Смарт мережі водопостачання є перспективним підходом до управління водними ресурсами, інтегруючи сенсори, аналітику даних та моніторинг у режимі реального часу для надання корисних інсайтів у виявлення витоків і оцінку ефективності системи. Однак високі витрати на впровадження, ризики кібербезпеки та відсутність стандартизації між різними сенсорними технологіями залишаються значними перешкодами для масштабного впровадження. Без встановлених стандартів для забезпечення сумісності інтеграція різних сенсорних технологій, зокрема, IoT [81], в єдину систему стає складною, що збільшує як витрати, так і операційні труднощі. Крім того, зростаюча залежність від взаємопов'язаних систем викликає занепокоєння з приводу вразливості до кіберзагроз, оскільки атаки на критичну інфраструктуру можуть порушити постачання води або знизити безпеку чутливих даних.

Важливим питанням, яке потрібно вирішити, є нерівність в доступі до цих передових технологій. У той час як розвинені регіони можуть легше впроваджувати сучасні технології, багато країн, що розвиваються, стикаються з фінансовими труднощами та відсутністю технічної експертизи, необхідної для впровадження «розумних» систем. В регіонах, де проблема водного дефіциту є гострою, основна увага часто приділяється забезпеченню доступу до води, а не передовим технологіям виявлення витоків. Майбутні дослідження повинні зосередитися на розробці економічно ефективних, масштабованих рішень, які можна впроваджувати в усьому світі. Гібридні системи, які поєднують доступні традиційні методи з аналізом даних на основі ШІ, можуть бути реалістичним рішенням для регіонів з обмеженими ресурсами.

Втрати води є значною проблемою для багатьох міст, що вимагає розробки та впровадження ефективних методів виявлення витоків води. Цей аналіз надає всебічну оцінку існуючих технологій виявлення витоків води, представляючи декілька ключових висновків, зокрема:

- Бібліометричний аналіз надав важливі відомості про тенденції досліджень, ключових учасників та публікацій у галузі виявлення витоків води. Аналіз наукових статей показав зростаючий інтерес до інноваційних методів

виявлення, особливо в останнє десятиліття, що відповідає зростанню глобальної обізнаності щодо проблем водної стійкості. Аналіз також виявив провідні установи та авторів, підкреслюючи співпраці в цій галузі.

– Традиційні методи, зокрема, акустичні техніки, методи з трасувальними газами, термографію та георадар (GPR), продемонстрували ефективність у виявленні витоків у конкретних контекстах, наприклад, металеві трубопроводи та підземні інфраструктури. Акустичні методи особливо ефективні для виявлення шуму або вібрацій, що виникають через витoki, але їхня ефективність обмежена для неметалевих труб та середовищ з високим фоновим шумом. Методи трасувальних газів, хоча й надійні, часто стикаються з логістичними труднощами в їх застосуванні. GPR може виявляти підземні порожнечі, але він залежить від умов ґрунту та потребує обережного вибору місця [15]. Незважаючи на їхні переваги, ці методи мають обмеження, зокрема, високі експлуатаційні витрати, залежність від кваліфікованого персоналу та можливість виникнення хибнопозитивних результатів. Майбутні дослідження повинні бути спрямовані на покращення економічної ефективності цих традиційних методів та зменшення неточностей, що дасть можливість збільшити їх застосовність у різних контекстах.

– Методи, що базуються на програмному забезпеченні, включаючи аналіз варіацій потоку, моніторинг точок тиску та техніки водного балансу, використовують аналітику даних та обчислювальні моделі для покращення можливостей виявлення витоків в режимі реального часу. Ці підходи надають цінну інформацію про оперативну ефективність систем водопостачання. Однак залишаються виклики, особливо щодо точності калібрування та надійності вхідних даних [15]. Успішна реалізація цих методів залежить від розробки передових технік калібрування та надійних систем збору даних, щоб забезпечити їх здатність ефективно виявляти витoki та сприяти проактивним стратегіям технічного обслуговування.

– Поява смарт мереж водопостачання є значним кроком вперед у виявленні витоків і управлінні ними. Інтегруючи апаратне забезпечення IoT-

пристроїв [82] та програмне забезпечення, ці системи надають можливість здійснювати постійний моніторинг, аналіз даних в режимі реального часу [83] та прогностичне технічне обслуговування, що підвищує оперативну ефективність водопостачальних компаній. Технології «розумного» водопостачання пропонують значні переваги, зокрема, раннє виявлення проривів, управління якістю води та оптимізація розподілу ресурсів. Однак високі початкові витрати та складність впровадження цих систем є бар'єрами для їх широкого застосування. Майбутні зусилля повинні бути спрямовані на оптимізацію економічної ефективності «розумних» технологій та спрощення процесів впровадження для полегшення їх інтеграції в існуючі інфраструктури.

Ефективне виявлення витоків є критично важливим не лише для оперативної ефективності, але й для мінімізації екологічних наслідків. Витоки води призводять до зайвого видобутку води, що виснажує життєво важливі ресурси, наприклад, річки та водоносні шари, що посилює дефіцит води, особливо в уразливих регіонах. Крім того, витоки збільшують енергоспоживання для очищення води та її розподілу, підвищуючи вуглецевий слід водопостачальних компаній. Усунення витоків води сприяє екологічній сталості шляхом збереження водних ресурсів, зменшення енергетичних втрат, скорочення викидів парникових газів та запобігання ерозії ґрунтів і деградації інфраструктури [15]. Майбутні дослідження повинні бути спрямовані на пошук рішень, які не лише технологічно передові, а й екологічно стійкі, забезпечуючи довгострокові переваги як для водопостачальних компаній, так і для екосистем.

Багатовимірний бібліометричний аналіз підкреслив сучасні тенденції в цій галузі та наголосив на необхідності міждисциплінарних підходів, що поєднують переваги традиційних та новітніх технологій. Визначивши потенціал смарт мереж водопостачання та інтеграцію передової аналітики даних [84], це дослідження надало практичні рекомендації для науковців та водопостачальних компаній, які прагнуть покращити свої можливості виявлення витоків.

### **3.4 Висновок до третього розділу**

В третьому розділі кваліфікаційної роботи оцінено методи виявлення витоків. Описано методи смарт водопостачання. Проаналізовано результати дослідження методів виявлення витоків у системах смарт водопостачання

## **РОЗДІЛ 4. БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ, ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ**

### **4.1 Планування та порядок проведення евакуації населення з районів наслідків впливу НС техногенного та природного характеру**

На тлі впровадження смарт систем водопостачання, орієнтованих на ефективне виявлення втрат, особливої важливості набуває ретельне планування та порядок проведення евакуації населення з районів, які можуть постраждати від наслідків надзвичайних ситуацій (НС) техногенного та природного характеру. Хоча смарт системи забезпечують моніторинг та оптимізацію ресурсів, вони не усувають усіх ризиків, пов'язаних з можливими аваріями на об'єктах водопостачання, забрудненням джерел води, пошкодженням інфраструктури внаслідок стихійних лих або диверсій. Такі події можуть зробити воду непридатною для споживання або повністю припинити її подачу, створюючи загрозу для здоров'я та життя населення, що вимагає негайної та скоординованої евакуації.

Ефективні методи виявлення втрат у смарт системах водопостачання дають змогу оперативно ідентифікувати аномалії, як от витіки або зміни тиску, що потенційно можуть бути попередниками масштабніших аварій. Однак, навіть найсучасніші технології потребують інтеграції з комплексними планами реагування на НС. Можливі значні пошкодження водопровідних мереж, спричинені, наприклад, землетрусами, повеннями або терористичними актами, можуть швидко перетворити райони з нормальною водою на зони, де доступ до життєво необхідних ресурсів критично обмежений або повністю відсутній. У таких випадках, навіть якщо смарт система точно визначить масштаби втрат, без чіткого плану евакуації та злагоджених дій, населення може опинитися у небезпеці.

Прикладом важливості такого поєднання є ситуації, коли методи виявлення втрат у смарт системах виявляють значний витік, що несе ризик підтоплення або забруднення, який вимагає негайної реакції. У такому випадку,

дані з системи дають можливість не лише швидко ідентифікувати проблему, але й надати точну інформацію для планування евакуаційних маршрутів та зон безпеки. Це перетворює технології виявлення втрат з суто інженерного інструменту на невід'ємну складову системи цивільного захисту, що підкреслює її подвійну функціональність та вирішальну роль у забезпеченні не лише ефективності водопостачання, а й безпеки та стійкості міського середовища загалом.

Процес організації евакуації населення в умовах надзвичайних ситуацій, що виникають внаслідок техногенних або природних чинників, регулюється спеціальним Порядком. Цей документ, затверджений постановою Кабінету Міністрів України від 30 жовтня 2013 року № 841, встановлює правила та етапи вивезення або виведення громадян із небезпечних зон, гарантуючи їхнє безпечне розміщення. Він також охоплює положення щодо евакуації матеріальних і культурних цінностей у випадках, коли виникає пряма загроза життю чи здоров'ю людей, або існує ризик пошкодження цих цінностей.

Таке планування є багатоступеневим процесом, що охоплює розробку детальних планів евакуації, визначення безпечних районів для тимчасового розміщення евакуйованого населення, а також організацію системи оповіщення. В контексті смарт систем водопостачання, оперативне виявлення втрат може слугувати важливим індикатором потенційної загрози, яка вимагатиме евакуації, наприклад, при виявленні значних аномалій у мережі, що можуть свідчити про серйозне пошкодження або забруднення. Таким чином, дані, отримані від смарт систем, інтегруються в загальну систему цивільного захисту, забезпечуючи швидше та обґрунтованіше прийняття рішень щодо евакуаційних заходів.

Залежно від конкретної ситуації, евакуація може бути як загальною, так і частковою, при цьому вона може мати тимчасовий або постійний характер. Наприклад, повна евакуація здійснюється у випадках радіоактивного чи хімічного зараження, масштабних затоплень населених пунктів або при руйнуванні гідротехнічних споруд, якщо хвиля прориву може досягти певної

території менш ніж за чотири години. Часткова евакуація організовується за рішенням місцевих органів влади.

Для проведення евакуаційних заходів залучаються транспортні засоби, що включають як наявний транспорт адміністративної території, так і транспортні засоби суб'єктів господарювання або приватних громадян у випадках прямої загрози життю. Витрати, пов'язані з використанням цього транспорту, покриваються з відповідного бюджету [85].

Рішення про евакуацію ухвалюється на різних рівнях: державний рівень (Кабінет Міністрів України), регіональний рівень (обласні державні адміністрації) та місцевий рівень. У невідкладних випадках першочергове рішення може бути прийняте керівником аварійно-рятувальної служби, який першим прибув на місце події.

Евакуація матеріальних і культурних цінностей здійснюється за умови наявності достатнього часу, який визначається на підставі моніторингу, прогнозування та лабораторного контролю. Процедура організації та планування евакуації матеріальних цінностей регламентується відповідною методикою, затвердженою Міністерством оборони України [86].

Злагоджена взаємодія між технологічними можливостями смарт систем водопостачання та ефективними планами евакуації є запорукою стійкості міста до надзвичайних ситуацій. Це не лише мінімізує прямі наслідки для здоров'я та життя громадян, але й сприяє швидшому відновленню функціонування критичної інфраструктури після кризи. Навчання населення правилам поведінки під час евакуації, відпрацювання маршрутів та координація дій усіх залучених служб є не менш важливими, ніж сама технологічна складова «розумних» систем. Зрештою, успішність будь-якої інновації вимірюється її здатністю захистити людей та забезпечити стабільність суспільства в умовах будь-яких викликів.

Отже, планування евакуації є невід'ємною частиною загальної стратегії безпеки, що доповнює технологічні можливості смарт систем водопостачання.

## **4.2 Вплив психоемоційного навантаження на розробників програмно-алгоритмічних засобів та методи його мінімізації**

З урахуванням складності та відповідальності, пов'язаної з розробкою програмно-алгоритмічних засобів для смарт систем водопостачання, особливо тих, що стосуються методів виявлення втрат, вкрай важливо приділяти увагу впливу психоемоційного навантаження на розробників. Створення ефективних алгоритмів для аналізу великих обсягів даних, що надходять від IoT-пристроїв, розробка надійних архітектур та забезпечення безперебійної роботи системи в режимі реального часу вимагають високої концентрації, аналітичного мислення та здатності до вирішення складних проблем. Цей інтенсивний розумовий процес, часто супроводжуваний стислими термінами та потенційними наслідками у разі помилок, може призводити до значного психоемоційного виснаження, що безпосередньо впливає на продуктивність, якість коду та, як наслідок, на точність і надійність методів виявлення втрат у системі водопостачання.

Недооцінка впливу психоемоційного навантаження може призвести до низки негативних наслідків, які безпосередньо позначаються на ефективності смарт систем. Виснаження, стрес та перевтома у розробників можуть спричинити зниження уваги, збільшення кількості помилок у коді, що потенційно призведе до неправильного функціонування алгоритмів виявлення втрат, некоректної інтерпретації даних або навіть до збоїв у системі. Це, своєю чергою, може мати серйозні фінансові та екологічні наслідки, оскільки невиявлені або неправильно ідентифіковані втрати води означатимуть подальшу розтрату цінного ресурсу та зниження загальної ефективності системи водопостачання. Таким чином, забезпечення психологічного комфорту та мінімізація стресу розробників є не просто питанням турботи про персонал, а прямою інвестицією в якість та надійність технологій.

У сучасних реаліях стрімкого розвитку інформаційних технологій, співробітники зазнають значного психоемоційного тиску. Безперервна



взаємодія з величезними обсягами даних, необхідність оперативного прийняття рішень, відповідальність за якість кінцевого продукту та дотримання жорстких дедлайнів можуть спричиняти стрес, професійне вигорання та зниження ефективності. З огляду на це, критично важливим є впровадження заходів, спрямованих на зменшення психоемоційного навантаження, з урахуванням діючих норм законодавства у сфері охорони праці.

У галузі розробки програмно-алгоритмічних засобів для смарт систем працівники нерідко стикаються з інтенсивним когнітивним навантаженням, потребою обробляти значний обсяг інформації, швидким темпом виконання завдань та високою відповідальністю за результати. Це може призвести до розвитку хронічного стресу, емоційного вигорання та інших негативних наслідків для здоров'я.

Психоемоційне навантаження – це сукупність психофізіологічних реакцій організму на вплив факторів робочого середовища, які викликають стрес, втому та інші несприятливі стани. Відповідно до ДСТУ ISO 10075-1:2005 «Ергономіка. Психічне навантаження в роботі. Частина 1. Загальні поняття, терміни та визначення», психічне навантаження визначається як вплив на психічну систему людини, що виникає в процесі виконання роботи. Цей стандарт розмежовує поняття «психічне навантаження» та «психічне напруження»: перше стосується зовнішніх факторів, що впливають на працівника, як от складність завдань, темп роботи, інформаційне навантаження та організаційні умови, тоді як друге описує внутрішню реакцію працівника на ці фактори, включаючи емоційні, когнітивні та фізіологічні аспекти [87].

Відповідно до нормативного акту НПАОП 0.00-1.28-10 «Правила охорони праці під час експлуатації електронно-обчислювальних машин», роботодавець зобов'язаний створювати такі умови праці, які максимально зменшують вплив шкідливих чинників, включаючи психоемоційне перевантаження. Ці Правила визначають конкретні вимоги до облаштування робочих місць користувачів персональних комп'ютерів. Зокрема, кожне робоче місце має розташовуватися в приміщенні з площею не менше 6 м<sup>2</sup> та об'ємом не менше 20 м<sup>3</sup> на одного

працівника. Рівень освітленості на робочому місці має бути не менше 300 лк при загальному освітленні та не менше 500 лк при комбінованому. Температура повітря в приміщенні повинна підтримуватися в діапазоні 22-24°C, відносна вологість – 40-60%, а швидкість руху повітря не повинна перевищувати 0,1 м/с.

Щодо організації режиму праці та відпочинку, передбачені регламентовані перерви: при роботі з ПК до 4 годин на день – одна перерва тривалістю 15 хвилин; при роботі понад 4 години – дві перерви по 15 хвилин кожна. Дотримання цих вимог сприяє зменшенню психоемоційного навантаження на працівників, забезпечуючи комфортні та безпечні умови праці [88].

Згідно з ДСТУ ISO 9241-5:2004 «Ергономічні вимоги до роботи з відеотерміналами в офісі. Частина 5. Вимоги до компонування робочого місця та до робочої пози», робоче місце повинно бути організоване таким чином, щоб мінімізувати фізичне та психоемоційне навантаження.

Вимоги до робочого стільця. Стілець має забезпечувати стабільну підтримку тіла у динамічній позі, яка є зручною впродовж певного часу, фізіологічно прийнятною та відповідає виконуваному завданню або роботі. До ключових вимог належать:

- вільна циркуляція крові в нижніх кінцівках;
- легкість зміни пози;
- забезпечення підтримки хребта;
- достатній рівень тертя поверхні сидіння для уникнення зісковзування.

Робоча поверхня: має бути стійкою та безпечною. Вона не повинна перекидатися, навіть якщо людина нахилиється вбік або сидить на її краю, а також при завантаженні обладнанням та робочими матеріалами (такими як папір, дисплеї тощо), які функціонують за своїм призначенням.

Контактні поверхні: робоча поверхня та елементи опорної конструкції, що контактують з користувачем впродовж тривалого часу, не повинні призводити до надмірних втрат тепла від тіла або бути холодними на дотик.

Згідно з ДСТУ ISO 9241-5:2004, робоче місце має бути спроектоване таким чином, щоб забезпечити фізіологічно комфортні умови для користувача (розробника програмного забезпечення). Це передбачає наявність регульованого стільця зі спинкою, що підтримує хребет, оптимальне розташування екрана дисплея (відстань 500-700 мм, кут зору 10-20°), а також достатній простір для ніг (не менше 600 мм у висоту). Забезпечення комфортної постави та можливості змінювати положення тіла сприяє зниженню м'язового напруження та втоми, що безпосередньо впливає на зменшення психоемоційного навантаження [89].

Методи мінімізації психоемоційного навантаження, як от раціональна організація робочого процесу, гнучкий графік, регулярні перерви, забезпечення ергономічних робочих місць, а також доступ до психологічної підтримки та можливостей для відпочинку, є критично важливими для підтримки високої працездатності розробників. Впровадження цих заходів не лише сприяє кращому самопочуттю персоналу, але й безпосередньо покращує якість програмно-алгоритмічних рішень, що розробляються для смарт систем водопостачання. Здорова та вмотивована команда розробників здатна створювати надійніші, точніші та ефективніші методи виявлення втрат, що є запорукою успішного функціонування всієї системи та досягнення цілей раціонального водокористування.

#### **4.3 Висновок до четвертого розділу**

В четвертому розділі кваліфікаційної роботи описано планування та порядок проведення евакуації населення з районів наслідків впливу надзвичайних ситуацій техногенного та природного характеру. Окремо розглянуто вплив психоемоційного навантаження на розробників програмно-алгоритмічних засобів та методи його мінімізації.

## ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі комплексно проаналізовано та оцінено апаратні, програмні та інтегровані методи виявлення втрат у смарт-системах водопостачання, підтвердивши ключову роль ІІІ та комбінованих підходів для підвищення ефективності та точності моніторингу.

В першому розділі кваліфікаційної роботи освітнього рівня «Бакалавр»:

- Описано предметну область смарт водопостачання.
- Розглянута методологія дослідження та процес збору даних.
- Подано безумовні результати бібліометричного аналізу публікацій щодо смарт систем водопостачання.

В другому розділі кваліфікаційної роботи:

- Проаналізовано апаратні методи виявлення витоків води для потреб смарт систем водопостачання.
- Розглянуто вбудовані технології виявлення витоків води в смарт системах водопостачання.
- Досліджено методи виявлення витоків води в смарт системах водопостачання на основі програмного забезпечення.

В третьому розділі кваліфікаційної роботи:

- Оцінено методи виявлення витоків.
- Описано методи смарт водопостачання.
- Проаналізовано результати дослідження методів виявлення витоків у системах смарт водопостачання.

У розділі «Безпека життєдіяльності, основи охорони праці» описано планування та порядок проведення евакуації населення з районів наслідків впливу надзвичайних ситуацій техногенного та природного характеру. Окремо розглянуто вплив психоемоційного навантаження на розробників програмно-алгоритмічних засобів та методи його мінімізації.

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ

- 1 Rajani, B.; Kleiner, Y. Comprehensive review of structural deterioration of water mains: Physically based models. *Urban Water* 2001, 3, 151–164.
- 2 El-Zahab, S.; Zayed, T. Leak detection in water distribution networks: An introductory overview. *Smart Water* 2019, 4, 5.
- 3 Glazer, A.N.; Likens, G.E. The water table: The shifting foundation of life on land. *Ambio* 2012, 41, 657–669.
- 4 Reis, A.L.; Lopes, M.A.R.; Andrade-Campos, A.; Henggeler Antunes, C. A review of operational control strategies in water supply systems for energy and cost efficiency. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2023, 175, 113140.
- 5 Escrive-Bou, A.; Lund, J.R.; Pulido-Velazquez, M. Saving Energy from Urban Water Demand Management. *Water Resour. Res.* 2018, 54, 4265–4276.
- 6 Dastpak, P.; Sousa, R.L.; Dias, D. Soil Erosion Due to Defective Pipes: A Hidden Hazard Beneath Our Feet. *Sustainability* 2023, 15, 8931.
- 7 Fontanazza, C.M.; Notaro, V.; Puleo, V.; Nicolosi, P.; Freni, G. Contaminant Intrusion through Leaks in Water Distribution System: Experimental Analysis. *Procedia Eng.* 2015, 119, 426–433.
- 8 Romero-Ben, L.; Alves, D.; Blesa, J.; Cembrano, G.; Puig, V.; Duviella, E. Leak detection and localization in water distribution networks: Review and perspective. *Annu. Rev. Control* 2023, 55, 392–419.
- 9 Fares, A.; Tijani, I.A.; Rui, Z.; Zayed, T. Leak detection in real water distribution networks based on acoustic emission and machine learning. *Environ. Technol.* 2023, 44, 3850–3866.
- 10 Crocco, L.; Prisco, G.; Soldovieri, F.; Cassidy, N.J. Early-stage leaking pipes GPR monitoring via microwave tomographic inversion. *J. Appl. Geophys.* 2009, 67, 270–277.
- 11 Mueller, F.J. Recent Developments in Pipeline Condition Assessment Using Inline Technologies; Pure Technologies Ltd.: Abu Dhabi, United Arab Emirates, 2013.

12 Stafford, M.; Williams, N.; Britain, G. Pipeline Leak Detection Study; Tech. Rep. Bechtel Limited for the Health and Safety Executive: London, UK, 1996.

13 Ho, C.-I.; Lin, M.-D.; Lo, S.-L. Use of a GIS-based hybrid artificial neural network to prioritize the order of pipe replacement in a water distribution network. *Environ. Monit. Assess.* 2010, 166, 177–189.

14 Oberascher, M.; Rauch, W.; Sitzenfrei, R. Towards a smart water city: A comprehensive review of applications, data requirements, and communication technologies for integrated management. *Sustain. Cities Soc.* 2022, 76, 103442.

15 Farah, E., & Shahrour, I. (2024). Water Leak Detection: A Comprehensive Review of Methods, Challenges, and Future Directions. *Water*, 16(20), 2975.

16 Donthu, N.; Kumar, S.; Mukherjee, D.; Pandey, N.; Lim, W.M. How to conduct a bibliometric analysis: An overview and guidelines. *J. Bus. Res.* 2021, 133, 285–296.

17 Thornton, J.; Sturm, R.; Kunkel, G. *Water Loss Control*, 2nd ed.; McGraw Hill Professional: New York, NY, USA, 2008; p. 632.

18 Zhang, J. Designing a cost-effective and reliable pipeline leak-detection system. In *Proceedings of the Pipeline Reliability Conference*, Houston, TX, USA, 19–22 November 1996.

19 Hunaidi, O. Detecting leaks in water-distribution pipes. *Constr. Technol. Update* 2000, 40, 6.

20 Fahmy, M.; Moselhi, O. Detecting and locating leaks in underground water mains using thermography. In *Proceedings of the 26th International Symposium on Automation and Robotic in Construction (ISARC 2009)*, Austin, TX, USA, 24–27 June 2009; pp. 61–67.

21 Burn, S.; DeSilva, D.; Eiswirth, M.; Hunaidi, O.; Speers, A.; Thornton, J. Pipe leakage—future challenges and Solutions. In *Proceedings of the Pipes Wagga Wagga Conference*, Wagga Wagga, NSW, Australia, 12–14 October 1999.

22 Ghazali, M.F. Leak detection using instantaneous frequency analysis. Ph.D. Thesis, University of Sheffield, Sheffield, UK, 2012.

23 Ayala–Cabrera, D.; Herrera, M.; Izquierdo, J.; Ocaña–Levario, S.; Pérez–García, R. GPR-Based Water Leak Models in Water Distribution Systems. *Sensors* 2013, 13, 15912–15936.

24 Meniconi, S.; Brunone, B.; Ferrante, M. In-Line Pipe Device Checking by Short-Period Analysis of Transient Tests. *J. Hydraul. Eng.* 2010, 137, 713–722.

25 Gong, J.; Lambert, M.F.; Simpson, A.R.; Zecchin, A.C. Single-Event Leak Detection in Pipeline Using First Three Resonant Responses. *J. Hydraul. Eng.* 2013, 139, 645–655.

26 Torres, L. Location of leaks in pipelines using parameter identification tools. *arXiv* 2014, arXiv:1406.5437.

27 Lee, P.; Lambert, M.; Simpson, A.; Vitkovsky, J.P.; Misiunas, D. Leak location in single pipelines using transient reflections. *Aust. J. Water Resour.* 2007, 11, 53.

28 Brunone, B.; Ferrante, M. Pressure waves as a tool for leak detection in closed conduits. *Urban Water J.* 2004, 1, 145–155.

29 Hamilton, S.; Charalambous, B. *Leak Detection: Technology and Implementation*; IWA Publishing: London, UK, 2013.

30 Pilcher, R. Leak detection practices and techniques: A practical approach. *Water* 21 2003, 44–45. Available online: <https://joat.co.za/wp-content/uploads/2020/05/Leak-Detection-Practices-and-Techniques-A-Practical-Approach.pdf>.

31 Hunaidi, O.; Wang, A. A new system for locating leaks in urban water distribution pipes. *Manag. Environ. Qual. Int. J.* 2006, 17, 450–466.

32 Fuchs, H.V.; Riehle, R. Ten years of experience with leak detection by acoustic signal analysis. *Appl. Acoust.* 1991, 33, 1–19.

33 Chastain-Howley, A. Transmission main leakage: How to reduce the risk of a catastrophic failure. In *Proceedings of the IWA Special Conference Leakage 2005*, Halifax, NS, Canada, 12–14 September 2005.

34 Mergelas, B.; Henrich, G. Leak locating method for precommissioned transmission pipelines: North American case studies. In *Proceedings of the IWA*

Special Conference Leakage 2005, Halifax, NS, Canada, 12–14 September 2005; pp. 12–14.

35 Chapman, H. Development of a Successful Internal Leak Detection and Pipeline Condition Assessment Technology for Large Diameter Pipes. In Proceedings of the 6th Annual WIOA NSW Water Industry Engineers & Operators Conference, Tamworth, NSW, Australia, 27–29 March 2012; pp. 29–37.

36 Ariaratnam, S.; Chandrasekaran, M. Development of an Innovative Free-Swimming Device for Detection of Leaks in Oil and Gas Pipelines. In Construction Research Congress 2010; American Society of Civil Engineers: Reston, VA, USA, 2010; pp. 588–596.

37 Farr, A. Alabama City Uses Leak Detection Survey on Large-Diameter Pipes; Trenchless Technology 2013; Available online: <https://trenchlesstechnology.com/alabama-city-uses-leak-detection-survey-on-largediameter-pipes/>.

38 Nikles, M.; Vogel, B.H.; Briffod, F.; Grosswig, S.; Sauser, F.; Luebbecke, S.; Bals, A.; Pfeiffer, T. Leakage detection using fiber optics distributed temperature monitoring. In Proceedings of the Smart Structures and Materials, San Diego, CA, USA, 14–18 March 2004; pp. 18–25.

39 Inaudi, D.; Belli, R.; Walder, R. Detection and localization of micro-leakages using distributed fiber optic sensing. In Proceedings of the 7th International Pipeline Conference, IPC2008, Calgary, AB, Canada, 29 September–3 October 2008; pp. 599–605.

40 Van Thienen, P. A method for quantitative discrimination in flow pattern evolution of water distribution supply areas with interpretation in terms of demand and leakage. *J. Hydroinformatics* 2013, 15, 86–102.

41 Irons, L.M.; Boxall, J.; Speight, V.; Holden, B.; Tam, B. Data driven analysis of customer flow meter data. *Procedia Eng.* 2015, 119, 834–843.

42 Van Thienen, P.; Vertommen, I. Automated feature recognition in CFPD analyses of DMA or supply area flow data. *J. Hydroinformatics* 2016, 18, 514–530.



43 Oven, S. Leak Detection in Pipelines by the use of State and Parameter Estimation. Master's Thesis, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norway, 2014.

44 Newell, R.D.; Greenwood, B. Mass Balance Leak Detect, Can It Work for You? Auspex, Incorporated, Houston, TX. 2006. Available online: <http://leaktrack2000.com/images/Entelec%202006.pdf>.

45 Savic, D.A.; Kapelan, Z.S.; Jonkergouw, P.M.R. Quo vadis water distribution model calibration? Urban Water J. 2009, 6, 3–22.

46 Nikjoofar, A.; Zarghami, M. 5–Water Distribution Networks Designing by the Multiobjective Genetic Algorithm and Game Theory. In *Metaheuristics in Water, Geotechnical and Transport Engineering*; Yang, X.-S., Gandomi, A.H., Talatahari, S., Alavi, A.H., Eds.; Elsevier: Oxford, UK, 2013; pp. 99–119.

47 Nagaraj, A.; Kotamreddy, G.R.; Choudhary, P.; Katiyar, R.; Botre, B.A. Leak Detection in Smart Water Grids Using EPANET and Machine Learning Techniques. IETE J. Educ. 2021, 62, 71–79.

48 Wu, Z.; Sage, P.; Turtle, D. Pressure-Dependent Leak Detection Model and Its Application to a District Water System. J. Water Resour. Plan. Manag. 2009, 136, 116–128.

49 Liggett, J.A.; Chen, L.C. Inverse Transient Analysis in Pipe Networks. J. Hydraul. Eng. 1994, 120, 934–955.

50 Kapelan, Z.S.; Savic, D.A.; Walters, G.A. A hybrid inverse transient model for leakage detection and roughness calibration in pipe networks. J. Hydraul. Res. 2003, 41, 481–492.

51 Covas, D.; Ramos, H. Case Studies of Leak Detection and Location in Water Pipe Systems by Inverse Transient Analysis. J. Water Resour. Plan. Manag. 2010, 136, 248–257.

52 Brahami, M.A.; Abdi, S.M.; Hamdi Cherif, S.; Bendahmane, A. Optimization of a Pipelines Leak Detection Method Based on Inverse Transient Analysis Using a Genetic Algorithm. Arab. J. Sci. Eng. 2023, 48, 1451–1460.

53 Che, T.-C.; Duan, H.-F.; Lee, P.J. Transient wave-based methods for anomaly detection in fluid pipes: A review. *Mech. Syst. Signal Process.* 2021, 160, 107874.

54 Komba, G.M.; Mathonsi, T.E.; Owolawi, P.A. Optimizing Leak Detection and Location in Water Distribution Networks Using SVM-RF Algorithm. In *Proceedings of the 2024 15th International Conference on Mechanical and Intelligent Manufacturing Technologies (ICMIMT)*, Cape Town, South Africa, 17–19 May 2024; pp. 27–33.

55 Salam, A.E.U.; Tola, M.; Selintung, M.; Maricar, F. A leakage detection system on the Water Pipe Network through Support Vector Machine method. In *Proceedings of the 2014 Makassar International Conference on Electrical Engineering and Informatics (MICEEI)*, Makassar, Indonesia, 26–30 November 2014; pp. 161–165.

56 Cody, R.; Narasimhan, S.; Tolson, B. One-class SVM–Leak detection in water distribution systems. In *Proceedings of the CCWI2017 15th International Computing and Control for the Water Industry*, Sheffield, UK, 5–7 September 2017.

57 Mashford, J.; De Silva, D.; Burn, S.; Marney, D. Leak detection in simulated water pipe networks using SVM. *Appl. Artif. Intell.* 2012, 26, 429–444.

58 Ahmad, S.; Ahmad, Z.; Kim, C.-H.; Kim, J.-M. A Method for Pipeline Leak Detection Based on Acoustic Imaging and Deep Learning. *Sensors* 2022, 22, 1562.

59 Zhang, C.; Alexander, B.J.; Stephens, M.L.; Lambert, M.F.; Gong, J. A convolutional neural network for pipe crack and leak detection in smart water network. *Struct. Health Monit.* 2023, 22, 232–244.

60 De Silva, D.; Mashford, J.; Burn, S. Computer Aided Leak Location and Sizing in Pipe Networks; Technical Report No. 17; Urban Water Security Research Alliance: City East, QLD, Australia, 2011; p. 27.

61 Mounce, S.R.; Mounce, R.B.; Jackson, T.; Austin, J.; Boxall, J.B. Pattern matching and associative artificial neural networks for water distribution system time series data analysis. *J. Hydroinform.* 2014, 16, 617–632.

62 Jafar, R.; Shahrour, I.; Juran, I. Application of Artificial Neural Networks (ANN) to model the failure of urban water mains. *Math. Comput. Model.* 2010, 51, 1170–1180.

63 Javadiha, M.; Blesa, J.; Soldevila, A.; Puig, V. Leak Localization in Water Distribution Networks using Deep Learning. In *Proceedings of the 2019 6th International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT)*, Paris, France, 23–26 April 2019; pp. 1426–1431.

64 Nam, Y.W.; Arai, Y.; Kunizane, T.; Koizumi, A. Water leak detection based on convolutional neural network using actual leak sounds and the hold-out method. *Water Supply* 2021, 21, 3477–3485.

65 Duda, O., Mykytyshyn, A., Mytnyk, M., & Stanko, A. (2023). Information technology sets formation and TNTU Smart Campus services network support. *CEUR Workshop Proceedings*, 3628, 661–671.

66 Fang, X.; Misra, S.; Xue, G.; Yang, D. Smart grid—The new and improved power grid: A survey. *IEEE Commun. Surv. Tutor.* 2012, 14, 944–980.

67 Liu, Z.; Kleiner, Y. State of the art review of inspection technologies for condition assessment of water pipes. *Measurement* 2013, 46, 1–15.

68 Boulos, P.F.; Wiley, A.N. Can We Make Water Systems Smarter? *Opflow* 2013, 39, 20–22.

69 Farah, E. Detection of water leakage using innovative smart water system: Application to SunRise Smart City demonstrator. Ph.D. Thesis, Université de Lille 1, Lille, France, 2016.

70 Cahn, A. Shaping the Architecture of Smart Water Networks. *AWWA* 2014, 106, 68–74. Available online: [https://swan-forum.com/wp-content/uploads/2023/08/AWWA\\_An-overview-of-smart-water-networks\\_July-2014.pdf](https://swan-forum.com/wp-content/uploads/2023/08/AWWA_An-overview-of-smart-water-networks_July-2014.pdf).

71 Günther, M.; Camhy, D.; Steffebauer, D.; Neumayer, M.; Fuchs-Hanusch, D. Showcasing a Smart Water Network Based on an Experimental Water Distribution System. *Procedia Eng.* 2015, 119, 450–457.

72 Duda, O., Kunanets, N., Matsiuk, O., & Pasichnyk, V. (2022). Cloud-based IT infrastructure for “smart city” projects. In D. Bădică, V. Kołodziej, M. Ganzha, & M. Paprzycki (Eds.), *Dependable IoT for human and industry* (pp. 389–409). Springer.

73 Owojaiye, G.; Sun, Y. Focal design issues affecting the deployment of wireless sensor networks for pipeline monitoring. *Ad Hoc Netw.* 2013, 11, 1237–1253.

74 Stoianov, I.; Nachman, L.; Madden, S.; Tokmouline, T.; Csail, M. PIPENET: A Wireless Sensor Network for Pipeline Monitoring. In *Proceedings of the IPSN07 The 6th International Symposium on Information Processing in Sensor Networks*, Cambridge, MA, USA, 25–27 April 2007; pp. 264–273.

75 Allen, M.; Preis, A.; Iqbal, M.; Srirangarajan, S.; Lim, H.B.; Girod, L.; Whittle, A.J. Real-time in-network distribution system monitoring to improve operational efficiency. *J. Am. Water Work. Assoc. (AWWA)* 2011, 103, 63–75.

76 Fantozzi, M.; Popescu, I.; Farnham, T.; Archetti, F.; Mogre, P.; Tsouchnika, E.; Chiesa, C.; Tsertou, A.; Gama, M.C.; Bimpas, M. ICT for Efficient Water Resources Management: The ICeWater Energy Management and Control Approach. *Procedia Eng.* 2014, 70, 633–640.

77 Barry, M.G.; Purcell, M.E.; Eck, B.J. Using smart water meters in (near) real-time on the iWIDGET system. In *Proceedings of the 11th International Conference on Hydroinformatics*, New York City, NY, USA, 17–21 August 2014.

78 Farah, E.; Shahrour, I. Leakage Detection Using Smart Water System: Combination of Water Balance and Automated Minimum Night Flow. *Water Resour. Manag.* 2017, 31, 4821–4833.

79 Negm, A.; Ma, X.; Aggidis, G. Review of leakage detection in water distribution networks. *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.* 2023, 1136, 012052.

80 Hu, Z.; Chen, B.; Chen, W.; Tan, D.; Shen, D. Review of model-based and data-driven approaches for leak detection and location in water distribution systems. *Water Supply* 2021, 21, 3282–3306.

81 Орлов М. В., Дуда О. М., Жовнір Ю. І., Грибовський О.М. Інструменти методології DevOps в інформаційних системах на основі технологій ІоТ. Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво, Випуск 57, 2024, с. 128-138. ISSN 2524-0552; eISSN 2524-0560, DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2024-57-15>.

82 Орлов М.В., Грибовський О.М., Жовнір Ю.І., Дуда О.М., Від концепції до реальності: роль методології devops в екосистемах іот. Науковий журнал «Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки». Том 35 (74) № 6 2024. Частина 2. Видавничий дім «Гельветика». 2024. с. 163-170. ISSN 2663-5941 (Print), ISSN 2663-595X (Online) DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.6.2/22>.

83 Palka, O., Dmytrotsa, L., Duda, O., Kunanets, N., & Pasichnyk, V. (2024). Information and technological tools for analysis and visualization of open data in smart cities. CEUR Workshop Proceedings, 3742, 1–12.

84 Duda, O., Kochan, V., Kunanets, N., Matsiuk, O., Pasichnyk, V., & Sachenko, A. (2019). Data processing in IoT for smart city systems.

85 Методика планування заходів з евакуації: затверджена наказом Міністерства внутрішніх справ України від 10 липня 2017 року № 579. – Київ: Міністерство внутрішніх справ України, 2017. – 50 с.

86 Постанова Кабінету Міністрів України від 30.10.2013 № 841.

87 ДСТУ ISO 10075-1:2005. Ергономіка. Психічне навантаження в роботі. Частина 1. Загальні поняття, терміни та визначення (ISO 10075-1:2000, IDT). Чинний від 2006-01-01. Вид. офіц. Держспоживстандарт України.

88 НПАОП 0.00-1.28-10. Правила охорони праці під час експлуатації електронно-обчислювальних машин. Чинний від 2010-01-01. Вид. офіц. Мінсоцполітики України.

89 ДСТУ ISO 9241-5:2004. Ергономічні вимоги до роботи з відеотерміналами в офісі. Частина 5. Вимоги до компонування робочого місця та до робочої пози (ISO 9241-5:1998, IDT). Чинний від 2005-01-01. Вид. офіц. Держспоживстандарт України.