

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»

Інформаційної безпеки та електронних комунікацій

(повне найменування інституту, факультету)

Інформаційних технологій та телекомунікацій

(повне найменування кафедри)

Пояснювальна записка

до дипломного проекту (роботи)

Магістр

(ступінь вищої освіти)

на тему РОЗРОБКА МЕТОДІВ ОПТИМІЗАЦІЇ РОБОТИ БЕЗДРОТОВОЇ
СИСТЕМИ МОНІТОРІНГУ СПОЖИВАННЯ ВОДИ

Виконав: студент(ка) _6_ курсу, групи РТ-512м

Спеціальності 172 Телекомунікації та радіотехніка

(код і найменування спеціальності)

Освітня програма (спеціалізація)

Інтелектуальні технології мікросистемної
радіоелектронної техніки

Керівник Огренич Є.В.

(прізвище та ініціали)

Рецензент _____

(прізвище та ініціали)

2023

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»
 (повне найменування закладу вищої освіти)

Факультет інформаційної безпеки та електронних комунікацій

Кафедра Інформаційних технологій електронних засобів

Ступінь вищої освіти Магістр

Спеціальність 172 Телекомунікації та радіотехніка
 (код і найменування)

Освітня програма (спеціалізація): Інтелектуальні технології мікросистемної радіоелектронної техніки
 (назва освітньої програми (спеціалізації))

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ІТЕЗ _____

« _____ » _____ 20__ року

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

Капінус Данило Сергійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проєкту (роботи) Розробка методів оптимізації роботи бездротової системи моніторингу споживання води

керівник проєкту (роботи) Огренич Євген Вікторович, к.т.н, доцент каф.ІТЕЗ

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом закладу вищої освіти від «21» листопада 2023 року № 448

2. Строк подання студентом проєкту (роботи) 22 грудня

3. Вихідні дані до проєкту (роботи) Структура водопостачання міст з багатопверховими домами

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Огляд переваг існуючих систем контролю споживання, методологічні засоби організації облік споживання води, вибір компонентів та розробка схеми, налаштування хмарного середовища для отримання дани, тестування роботи системию

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

6. Консультанти розділів проєкту (роботи)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	прийняв виконане завдання
1	Євген ОГРЕНИЧ	03.10.23	
2	Євген ОГРЕНИЧ	17.10.23	
3	Євген ОГРЕНИЧ	07.11.23	
4	Євген ОГРЕНИЧ	21.11.23	
нормоконтроль	Ірина ПОСПЕЄВА	01.12.23	

7. Дата видачі завдання «04» __вересня____2023_року.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проєкту (роботи)	Строк виконання етапів проєкту (роботи)	Примітка
1	<i>Пошук та вивчення наукових джерел</i>	9.10.23	
2	<i>Аналіз систем керування розподілом води</i>	11.10.23	
3	<i>Методологічні засади віддаленого обліку води</i>	12.10.23	
4	<i>Вибір компонентів для системи</i>	20.10.23	
5	<i>Налаштування програмного забезпечення та тестування</i>	15.11.23	
6	<i>Оформлення пояснювальної записки</i>	25.11.23	
7	<i>Перевірка ПЗ на доброчесність</i>	02.12.23	
8	<i>Створення презентації у Power Point</i>	16.12.23	

Студент(ка)

_____ **Данило КАПНУС**
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник проєкту (роботи)

_____ **Євген ОГРЕНИЧ**
(підпис) (прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

ПЗ: 63 сторінки, 20 рисунків, 7 таблиць, 20 джерел

БАЗА ДАНИХ, СИСТЕМА, ЛІЧИЛЬНИК, СТРУКТУРНА СХЕМА,
ПРОГРАМА, ІНТЕРФЕЙС

Мета роботи розробка методів оптимізації віддаленого збору даних з лічильників води, що розподілені територіально у квартирах багатоповерхових домів та у приватних будинках та створення системи, що дозволить враховувати виходи з ладу вузлів системи водопостачання.

Об'єкт розробки: система віддаленого збору даних.

Предмет розробки: апаратна та програмна реалізація вузлів та шлюзів для моніторингу споживання води.

Здійснено огляд сучасної літератури з питань контролю енергоресурсів, проведено аналіз методологічних засад щодо обліку споживання води. Проведено розробку тестового узла та шлюза з метою перевірки працездатності системи. Обрано хмарне середовище для зберігання даних з датчиків, проведено тестування системи. Розроблені на основі запропонованого методу шифратор та дешифратор надають можливість захистити від несанкціонованого доступу.

ЗМІСТ

Реферат.....	4
ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ	7
Вступ	8
1 Системи керування розподілом води	10
1.1 Ефективне управління розподілом води	10
1.2 Структура водорозподільчої системи	12
1.3 Тенденції розвитку систем контролю розподілу енергоресурсів.....	16
2 Методологічні засади віддалено контролю розподілу води	22
2.1 Розподіл води та його основні рівняння	22
2.2 Контроль тиску	24
2.3 Прилади контролю тиску.....	25
2.4. Розміщення приладів контролю тиску	26
2.4.1. Обчислювальний метод	26
2.4.2. Еталонний метод тиску	27
2.4.3. Методи на основі числення/оптимізації	27
2.5.1. Класична стратегія контролю	30
2.5.2. Розширені стратегії контролю	30
2.5.3. Оптимальний контроль	33
2.5.4. Контроль у реальному часі.....	35
2.5.5. Контроль без моделі.....	36
2.5.6. Порівняння методів контролю	36
3 Реалізація оптимізованої системи розподілу води.....	39
3.1 Вибір бездротові мережі для оптимізованої системи розподілу води.....	39

3.1.1 Bluetooth Low Energy	39
3.1.2 Вузькосмуговий IoT	39
3.1.3 Мережі LoraWAN	40
3.2 Вибір датчиків системи.....	44
3.3 Передача даних	49
3.4 Керування електромагнітними клапанами	50
3.5 Шлюзові модулі	52
4 Серверне програмне забезпечення для обробки та тестування системи	54
4.1 Налаштування серверного програмного забезпечення	54
4.2 Перевірка роботи системи	56
ВИСНОВКИ	59
Перелік джерел посилання	60
Додаток А – Тексти основного блоку програми конвертера MAVLink FrSky	Ошибка! Закладка не определена.
Додаток Б – Презентація	63

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

- WDN – water distribution network
BPM – Водорозподільча мережа
LoRa – Long Range

ВСТУП

Чиста питна вода є значним ресурсом, необхідним для підтримки життя та відіграє важливу роль у добробуті людей [1]. Забезпечення водними ресурсами зростаючого населення міських районів було серйозною проблемою в останні роки. У сценаріях міського розвитку пошук нових ресурсів або розширення існуючої системи є дорогим і зазвичай може вважатися фізично та економічно обтяжливим, якщо не неможливим. Сьогодні вдосконалення оперативного управління системами водопостачання та розподілу води розглядається не лише розробка нових ресурсів, схем збереження та оптимального використання води.

Водопровідна мережа – це складна і взаємопов'язана система. Це одна з найважливіших інфраструктурних об'єктів водопостачання. Основне їхнє призначення – транспортування води від очисних споруд та водосховищ до споживачів. Їх проектування та технічне обслуговування є значними капітальними інвестиціями у забезпечення чистою водою, яка відповідає поточному покращенню рівня життя споживачів.

Економія енергоресурсів актуальна для багатьох розвинутих країн світу. Економія неможлива без обліку їхньої витрати, особливо у великих містах, де споруджуються багатоповерхові будинки. Для обліку витрат енергоресурсів, таких, як витрати питної (холодної) та гарячої води, витрати енергії для підігрівання помешкань та комунальних приміщень, обліку електроенергії, витрат газу ставлять індивідуальні лічильники по кожному виду фізичних об'єктів.

Це призводить до того, що, з одного боку, ведеться облік витрат енергоресурсів, зокрема і комерційний, а з іншого – збільшуються витрати на підтримку великої кількості обслуговуючих робітників, що, своєю чергою, сприяють збільшенню ціни витратної одиниці кожної фізичної величини.

В сучасних умовах спеціалізовані організації проводять водну підготовку і подачу води на підприємства і в будинки. З такими підприємствами необхідно розраховуватися за спожитий обсяг води, поставленої згідно договорів.

В роботі розробляється метод оптимізації роботи бездротової системи моніторингу споживання води шляхом організації віддаленого контролю вузлів водопостачання з реалізацією тестового комплекту пристроїв збирання та відправки на сервер даних, а також керування датчиками

1 СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ РОЗПОДІЛОМ ВОДИ

1.1 Ефективне управління розподілом води

Системи розподілу питної води полегшують передачу переносної води з водних ресурсів, таких як резервуари, річки та резервуари для води, до промислових, комерційних і житлових споживачів через складні підземні мережі труб.

Ефективне управління розподілом питної води вивчалось в багатьох наукових роботах. Таким чином, у цьому розділі представлені деякі дослідження, які стосуються таких аспектів, як Інтернет речей, штучний інтелект і протоколи зв'язку для апаратних пристроїв з низьким енергоспоживанням.

У [5] автори пропонують архітектуру на основі машинного навчання для моніторингу та керування системою розподілу води на основі динамічних робочих умов. Це рішення використовує інтелектуальні лічильники для генерації даних у режимі реального часу за допомогою ефективних програмних архітектур.

У [2] авторами запропоновано модель на основі комплексного моніторингу CS водорозподільних мереж за допомогою пристроїв виявлення. У цьому документі описано, як моніторинг покладається на технології інтелектуального вимірювання та бездротові датчики у вузлах, що живляться від батарей, що обмежує високу частоту дискретизації. У результаті технології CS можуть скоротити час виконання процесу на 50%, досягаючи значної економії енергії.

Відповідно до [16], більшість втрат питної води відбувається під час транспортування, тому системи на основі IoT сприяють моніторингу стану труб розподілу питної води. Крім того, процес прогнозування попиту на воду можна виконувати за допомогою методів глибокого навчання та традиційних методологій для часових рядів, таких як авторегресійне інтегроване ковзне середнє (ARIMA).

З іншого боку, в [7] автори описують проект з покращення водопостачання та превентивного реагування на посуху та втрату води шляхом зменшення витоків труб та догляду за старими трубами. Щоб досягти цього, дані збираються

датчиками, підключеними до пристроїв Інтернету речей, які використовують багатосаровий перцептрон (MLP) і алгоритми довгострокової пам'яті. З іншого боку, оптимізація потужності є критичною при використанні малопотужних пристроїв IoT, що описано в [17], де автори описують використання бездротової мережі зв'язку між літальними апаратами та сенсорними вузлами. Його зв'язок оптимізовано шляхом мінімізації енергоспоживання дрона для отримання оптимальних траєкторій збору даних.

Відповідно до [8], управління ресурсами питної води є великим викликом, який породжує ініціативи контролю на глобальному рівні, а також для сталого розвитку. У цьому контексті рішення Smart Cities сприяють раціональному споживанню води. Це дослідження пропонує систему моніторингу та виявлення витоків у WDNP за допомогою методів виведення даних і глибокого навчання. Так само в [19] автори описують, як Інтернет речей генерує рішення в цих сферах, причому є фактор, пов'язаний із участю громадян у підтримці політики сталого та ефективного використання водних ресурсів. Крім того, описано, що необхідно провести дослідження споживання води до, під час і після періоду ув'язнення через пандемію COVID, що є важливим для сприяння розробці освітніх заходів і сприяння стійкій поведінці, заснованій на аналіз зібраних даних.

Оптимізація систем розподілу води досліджується вже понад 30 років, і її можна загалом розділити на дві сфери застосування: проектування та експлуатація. Операція може включати визначення робочих критеріїв перекачування, контроль стану клапанів або рівня води в баку. Основна увага цієї роботи зосереджена на оптимальній роботі водопровідних мереж. Після піонерської роботи Сімпсона та ін. (1994), GA широко застосовувалися для оптимізації систем розподілу води за гідравлічними критеріями. Генетичний алгоритм спочатку був розроблений Холландом (1975), і з тих пір його вдосконалили Де Джонг (1975), Голдберг (1989), а згодом багато інших (Міеттінен та ін. 1999).

Основні переваги GA включають використання рішень, що розвиваються, і визначення кількох рішень, з яких особа, яка приймає рішення, може вибирати, на відміну від одного рішення. Основний недолік полягає у великих обчислювальних

труднощах для досягнення оптимального або майже оптимального рішення. Було зроблено вдосконалення в GA (Dandy та ін. 1996; Walters та ін. 1999), і низка досліджень продемонструвала ефективність GA в операційній оптимізації систем розподілу води (Goldberg та Kuo 1987; Mackle та ін. 1995). ; Engelbrecht і Haarhoff 1996; Schwab та ін. 1996; De Schaetzen та ін. 1998). Денді та Енгельхардт (2001, 2006) використовували техніку генетичного алгоритму, щоб знайти майже оптимальний графік заміни труб водопостачання. Мета полягала в мінімізації теперішньої вартості капіталу, витрат на ремонт і пошкодження. Ван Зіл та ін. (2004) підвищили ефективність операційної оптимізації GA за допомогою гібридного методу, який поєднує метод GA зі стратегією пошуку альпініста. Гібридний метод сходиться швидше. Він був застосований для оптимізації роботи водорозподільної системи Річмонда у Великобританії. Метою було оптимізувати коливання рівня води в резервуарах для зберігання в різні періоди.

1.2 Структура водорозподільчої системи

Водорозподільна мережа (water distribution network WDN), така як показана на рис. 1.1, складається з набору взаємопов'язаних труб, кожна з яких має визначену довжину, діаметр і коефіцієнт опору тертю. Кожна труба перетинається в точці споживання (попиту), де потік води входить або виходить з мережі. Ця точка відома як вузол з'єднання. Кожна труба також може містити елементи мережі, такі як насоси, фітинги та клапани. Насос використовується для забезпечення достатнього тиску для задоволення потреб замовника у вузлах з'єднання. WDN також може мати вузол фіксованого рівня, такий як резервуар або резервуар для зберігання, де відомий напір або тиск. У проектуванні WDN гідравлічні моделі відіграють вирішальну роль у плануванні та управлінні параметрами системи. Стаціонарна гідравлічна модель [8] надає розуміння оцінки стану мережі [9] і розуміння мережі трубопроводів і пов'язаних з нею компонентів для вирішення потенційних

несприятливих інцидентів. Динамічні гідравлічні моделі використовують дані, отримані в режимі реального часу від сенсорного вузла, приєднаного до компонента WDN, такого як лічильник води, для оцінки поточних умов мережі та автоматичного надсилання керуючих сигналів різним компонентам мережі. Це регулює продуктивність водорозподільної мережі (ВРМ) і зробить її більш ефективною.

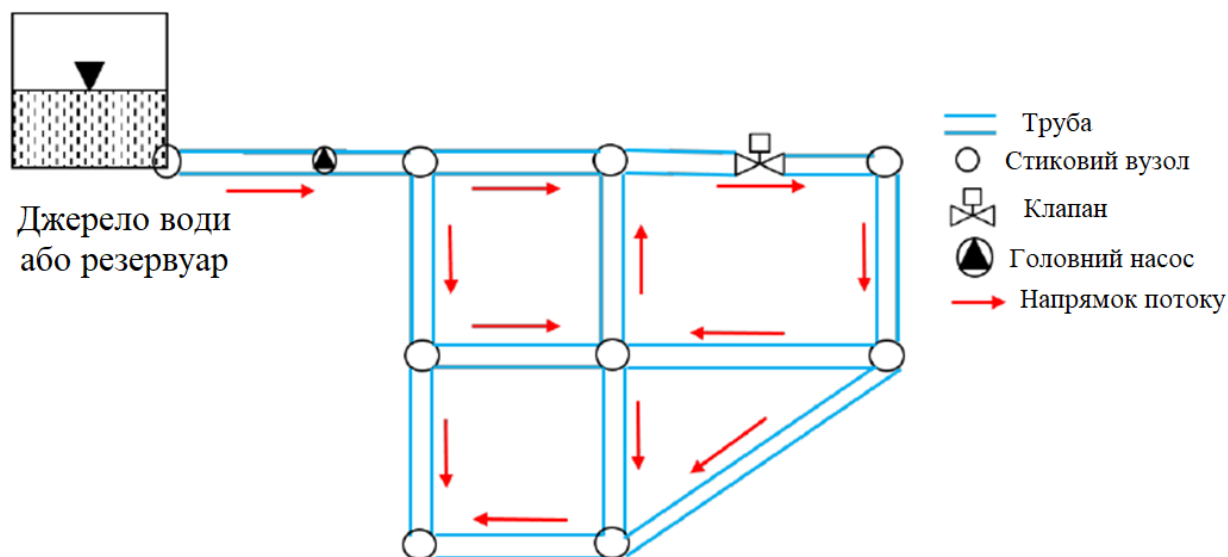


Рисунок 1.1 – Схема водорозподільної мережі.

Мережі розподілу води складаються з таких життєво важливих компонентів, як: труби, резервуар, дамби, насоси та клапани.

У WDN втрати непередбачувані та можуть виникнути через витік у вузлах з'єднання, а також уздовж труб. У більшості випадків через труби в мережах втрачається значний об'єм води. Щоб зменшити витоки з мережі, підприємствам водопостачання були запропоновані деякі основні стратегії управління витоками. Ці стратегії проілюстровано на рис. 1.2.

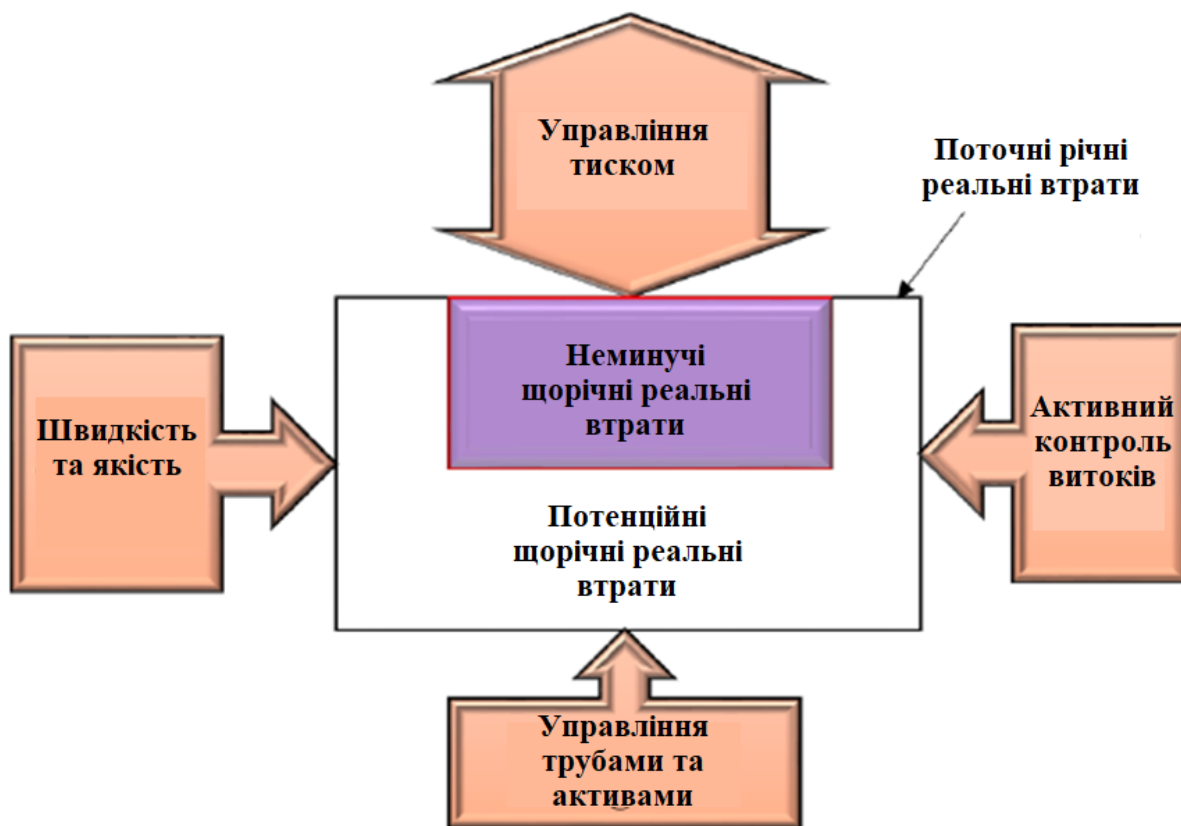


Рисунок 1.2 – Основна стратегія управління витокami [1].

Розглянувши рис. 1.2, можна побачити, що управління тиском є одним із фундаментальних елементів стратегії управління витокami. Це пов'язано з тим, що попередні дослідження показали, що існує зв'язок між мережевими витокami та тиском. Представляючи витокi як потік через отвір у трубі, співвідношення витоків і тиску виражається як:

$$q = kP^n \quad (1.1)$$

де q_i — швидкість витoku,

k — коефіцієнт витoku,

P — напір у трубі,

n — експонента витoku.

Значення n коливається від 0,5 до 2,5 залежно від типу витоків. Отже, з (1.1) випливає, що вищий тиск призводить до високої швидкості витoku, і навпаки. З (1.1) очевидно, що потік витoku буде дуже чутливим до змін тиску, коли $n > 1$. Хоча

поведінка потоку витoku є складним явищем, і розуміння гідравліки витoku є необхідним для кращого уявлення про співвідношення витoku та тиску. Більш повне представлення базується на використанні концепції фіксованої площі та змінної площі розряду (FAVAD), запропонованої Мей. Ця концепція базується на тому факті, що отвори для витoku змінюються по довжині труби. Тому залежність витік-тиск далі виражається як:

$$Q_l = C_d A_l^f \sqrt{2gH} + C_d A_l^v \sqrt{2gH} \quad (1.2)$$

де Q_l позначає швидкість витoku,

C_d – коефіцієнт витoku,

A_l^f , фіксована площа розкриття витoku,

A_l^v змінна площа розкриття витoku.

H представляє напір, створюваний насосом,

g — прискорення сили тяжіння.

В обох представленнях виразу швидкості потоку витoku можна зробити висновок, що потік витoku чутливий до коливань тиску.

З обох зображень витoku очевидно, що зменшення тиску в мережі значно зменшить швидкість потоку витoku. Тому в WDN стратегія управління тиском визнана однією з найбільш ефективних і економічно ефективних політик для зменшення витоків. Окрім мінімізації витоків у WDN, підприємства водопостачання також можуть отримати вигоду від управління тиском, зменшуючи ризики розриву труби та, отже, подовжуючи термін служби труби. Це значною мірою зменшить вартість технічного обслуговування та ремонту трубопроводів і пов'язаних з ними компонентів.

У системі водорозподілу головний насос повинен забезпечувати достатній тиск, щоб задовольнити вимоги споживача у вузлах з'єднання. Однак вищий тиск може призвести до розриву труби, особливо для труб малого діаметру. Таким чином, у WDN ймовірність поломки труби в мережі в результаті зміни тиску в системі можна оцінити за допомогою моделі, запропонованої Swamee et al. як:

$$Pr_k = \frac{0.021e^{-4.35D_k} + 21.4D_k^8 e^{-3.73D_k}}{1 + 10^5 D_k^8} \quad (1.3)$$

де Pr_k позначає ймовірність поломки труби k ,
а D_k представляє її діаметр.

З (1.3) можна зробити висновок, що ймовірність поломки в трубі є спадною функцією діаметра труби під впливом зміни тиску води. Швидкість, з якою виникають нові витоки, значною мірою залежить від стрибків тиску та високого тиску. Крім того, не можна ігнорувати рівень потреби у воді. Попит на воду має стохастичний характер; основний прорив труби, як правило, відбувається пізно ввечері та рано вранці, коли тиск у системі є найвищим. Заслуговує на увагу доказ того, що контроль робочого тиску є ефективним засобом зменшення витоків у мережах і для зменшення ризику подальших витоків шляхом згладжування коливань тиску.

1.3 Тенденції розвитку систем контролю розподілу енергоресурсів

Майже до кінця 20 століття для обліку споживання газу, води, тепла та електроенергії використовувалися лише прилади з механічним приводом. Споживачі записували та надсилали власні показання, а це означає, що постачальники часто отримували із затримкою або неправильні дані через людську помилку. Були й інші проблеми:

- абоненти використовували різні хитрощі, щоб занизити дані про споживання ресурсів

- інспектори поклалися на користувачів: якщо споживача не було вдома або не дав інспектору доступ до лічильника, перевірити показники лічильника було неможливо

- постачальники зазнали збитків через невиявлені аварії та витoki

З розвитком нових технологій ситуація змінилася; у 1990-х роках були представлені цифрові лічильники, а також стала можлива автоматична передача даних через інформаційні мережі. Пристрої обліку стали точнішими та вдосконаленими, додалися нові функції. Пізніше Інтернет речей (IoT) навіть дозволив користувачам і постачальникам керувати пристроями віддалено.

Усі ці інновації відкрили абсолютно нові можливості, оскільки інтелектуальні пристрої автоматично збирають і передають дані, повідомляють про аварії та інші події, а багато процесів стали автоматизованими. Переваги сучасних технологій очевидні: ви отримуєте комфорт, точність і економію.

Інтелектуальний облік ресурсів активно впроваджується в багатьох країнах світу, включаючи країни ЄС, Китай, Японію, США, Канаду, Мексику, Бразилію, Індію та багато інших. Так, згідно зі Звітом про моніторинг ринку за вересень 2023 року, підготовленим ACER, на кінець 2022 року частка розумних лічильників електроенергії у 13 країнах перевищила 80% від загальної кількості приладів обліку. У таблиці нижче наведено ступінь інтеграції інтелектуального вимірювання та можливості, які розумні технології пропонують постачальникам ресурсів у цих країнах.

Розумна мережа — це набір пристроїв, програм, технологій і рішень, які забезпечують постачальників ресурсів сучасною цифровою інфраструктурою, автоматизованим вимірюванням даних і зручною обробкою даних. ІТ-рішення широко використовуються в розумних мережах. Без таких систем неможливо було б створити сучасні розумні міста.

Інтелектуальна мережа включає в себе такі компоненти:

- кінцеві пристрої (розумні лічильники або радіомодулі);
- шлюзи;
- мережа передачі даних;
- програмне забезпечення оператора;
- розумні датчики.

Кінцеві пристрої за допомогою цифрових інтерфейсів записують показання лічильників, забезпечують збереження даних у внутрішній пам'яті, а потім передають дані на шлюзи згідно з розкладом і налаштуваннями. Серед кінцевих пристроїв можуть бути розумні лічильники з вбудованими радіомодулями, а також радіомодулі для обліку води та радіомодулі для обліку газу.

Шлюзи або базові станції отримують дані від ряду кінцевих пристроїв і передають їх через мережу на сервер.

Мережа передачі даних доставляє інформацію на сервер по дротових або бездротових каналах зв'язку за допомогою відповідних протоколів. Для передачі показань лічильників використовуються малопотужні глобальні мережі (LPWAN).

Програмне забезпечення дозволяє постачальнику ресурсу отримувати дані в зручному форматі, а також обробляти і зберігати показання.

Інтелектуальні датчики можна встановлювати скрізь, де можливо автоматизувати запис подій і зйомку параметрів або показань:

- витік;
- вологість і температура;
- наповнення контейнера;
- спрацьовування різних датчиків;
- передача поточної геолокації;
- передача даних вимірювань.

Ці пристрої посилають сигнал провайдеру ресурсу, якщо сталася аварія або інша надзвичайна ситуація, яка передбачена функціональністю датчика.

Далі ми детальніше розглянемо другий компонент рішення – мережу передачі даних LoRaWAN.

Мережі LoRaWAN із підтримкою IoT для розподілу комунальних послуг

LoRaWAN — це мережевий протокол, який передає корисне навантаження невеликого розміру з мінімальною кількістю енергії, дозволяючи використовувати автономні джерела живлення, які не потребують заміни протягом кількох років. Раніше це було неможливо.

Цей метод базується на технології LoRa – методі модуляції, де для передачі даних використовуються неліцензовані діапазони частот. При цьому сигнали мають високу проникаючу здатність, а це означає, що технологію LoRa можна використовувати в густонаселених містах і навіть отримувати дані з пристроїв, розміщених у підвалі.

Технологія LoRa і протокол LoRaWAN забезпечують двосторонній бездротовий зв'язок, захищений шифруванням. Кінцеві пристрої передають дані про споживання по радіоканалу до шлюзів, потім дані переміщуються через Інтернет на сервер і стають доступними для постачальників послуг.

Таким чином, LoRaWAN дозволяє побудувати мережу з такими характеристиками:

- висока проникаюча здатність крізь перешкоди;
- автономія;
- двосторонній радіозв'язок;
- висока дальність передачі сигналу;
- гарантований захист даних;
- просте та недороге масштабування мережі.

Усі ці характеристики допомагають будувати передові розумні мережі обліку газу та води.

Як мережі LoRaWAN використовуються в розумному обліку ресурсів

Технологія LoRa дозволяє швидко, легко і з мінімальними інвестиціями інтегрувати інтелектуальні електромережі для ефективного управління газом і водою.

Низька вартість розгортання мережі. Мережі LoRaWAN мають перевагу перед Інтернетом у тому, що їх можна розгорнути в будь-якій місцевості за відносно низьких витрат – потрібно лише придбати та встановити необхідну кількість базових станцій (шлюзів). Щоб реалізувати подібне завдання традиційним способом, необхідно прокласти кабелі та встановити серверне та телекомунікаційне обладнання, а значить, газо- та водопостачання витратить значно більше коштів.

Висока проникаюча здатність через перешкоди. Лічильники для окремих споживачів або для цілої будівлі можуть бути розташовані в підвалах, багатоповерхових багатоповерхівках і великих офісних центрах. Сигнали в таких місцях стикаються з багатьма фізичними перешкодами (наприклад, стінами та стелями) і на них впливають радіоперешкоди. Висока проникаюча здатність частот LoRaWAN означає, що вплив цих факторів на поширення сигналу зводиться до мінімуму. Завдяки цьому мережі на основі LoRaWAN можна використовувати у великих містах і районах щільної забудови.

Двосторонній зв'язок. Деякі прилади обліку оснащені додатковими функціями, які дозволяють постачальникам послуг віддалено взаємодіяти з ними, наприклад, налаштовувати частоту передачі даних. У таких ситуаціях розумний пристрій має бути здатним не лише передавати сигнал, але й приймати його. Двосторонній зв'язок протоколу LoRaWAN може зробити це можливим.

Енергоефективність. Розумні пристрої, що використовують протокол LoRaWAN, не передають дані постійно, натомість вони надсилають дані через певний проміжок часу відповідно до налаштувань. Крім того, дані в мережі LoRaWAN передаються на низькій швидкості для економії заряду акумулятора. Таким чином, бездротові розумні прилади обліку можуть працювати автономно протягом декількох років.



Рисунок 1.3 – Цільові групи системи

2 МЕТОДОЛОГІЧНІ ЗАСАДИ ВІДДАЛЕНО КОТРОЛЮ РОЗПОДІЛУ ВОДИ

2.1 Розподіл води та його основні рівняння

Враховуючи WDN, як показано на рис. 1.1, можна побачити, що його топологія дозволяє використовувати теоретико-графові властивості для розробки математичного представлення. Припускаючи, що мережа складається з N_b гілок/труб, з'єднаних N_n кількістю вузлів, що складається з n_s кількості джерел і n_d кількості вузлів попиту, матриця випадковості вузла-гілки $Q, u \in \mathbb{R}^{N_b \times N_n}$ може бути виражена як:

$$C_{ij} = \begin{cases} +1, & \text{if flow in branch (pipe in Figure 1) } j \text{ leaves node } i \\ -1, & \text{if flow in branch (pipe in Figure 1) } j \text{ enters node } i \\ 0, & \text{if branch (pipe in Figure 1) } j \text{ is not incident to node } i \end{cases} \quad (2.1)$$

Рівняння вузлового балансу можна виразити так:

$$C_{i,j}Q = -I \quad (2.2)$$

де $Q \in \mathbb{R}^{N_b}$ and $I \in \mathbb{R}^{N_n}$ є векторами потоків у гілках і вузлових ін'єкціях.

Вектор Q в основному складається з потоків, як показано червоними стрілками (вказують напрямок потоків) на малюнку 1, тоді як вектор I складається як з відбору, так і з подачі на вузлах з'єднання на малюнку 1. Рівняння (2/2) можна розкласти на щоб виразити вузловий баланс для вузлів попиту як:

$$C_i Q = -q \quad (2.3)$$

Сі в (3) є елементом розкладеного $C_{i,j} = [C_s \quad C_l]^T$

q - вектор вузлових вилучень.

Збереження енергії для замкнутих WDN можна виразити як:

$$\Delta h = [C_s^t \quad C_l^t] \begin{bmatrix} h_s \\ h_l \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

де h_s і h_l - напір у джерелі та вузлі попиту відповідно.

A — перепад тиску вздовж труби. Для кожної труби і перепад тиску можна виразити як функцію гідравлічного опору труби k .

$$\Delta h_i = k_i Q_i^\alpha = k_i Q_i |Q_i|^{\alpha-1} \quad (2.5)$$

У (2.5) k — гідравлічний опір труби, α — коефіцієнт тиску.

Підставляючи рівняння (2.5) у (2.4), збереження енергії в матричній формі для WDN можна виразити як:

$$\text{diag}(k|Q|^{\alpha-1})Q - C_s^t h_s - C_l^t h_l = 0 \quad (2.6)$$

Визначальна матриця $A = \text{diag}(k|Q|^{\alpha-1})$ гідравлічну імітаційну модель можна записати у матричній формі так:

$$\begin{bmatrix} A & -C_l^t \\ C_l & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q \\ h_l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_s^t h_s \\ -q \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

Діагональні елементи матриці A залежать від елемента, встановленого в трубі. Для труби і з PRV, встановленим, як показано на малюнку 1 як «Клапан», елемент:

$$A(i, i) = k|Q|^{\alpha-1} + m(Q) \quad (2.8)$$

де $m(Q)$ - незначна втрата через PRV. Для труб з насосами («головний» насос на рис. 1.1),

$$A(i, i) = -\omega^2 (h_i - k(Q_{ij}/\omega)^n) / Q_{ij} \quad (2.9)$$

де ω і n – параметри, що залежать від типу встановлених труб.

2.2 Контроль тиску

Контроль тиску в системах водопостачання є добре вивченою схемою мінімізації витоків. Помітні роботи на цю тему можна простежити на початку 1990-х років. Хінді та Хамам досліджували використання клапанів із постійним вихідним тиском і клапанів з модулем потоку для мінімізації втрат у WDN. Однак надмірне обчислювальне навантаження спонукало Хамама та Хінді використовувати штучні нейронні мережі для контролю тиску. Зниження втрат спостерігається після впровадження цієї схеми. Дай і Лі представили розширену модель для PRV, щоб забезпечити трирежимну роботу (відкритий, нормальний, зворотний клапан) у водорозподільних мережах для мінімізації втрат без порушення обмежень. Ця формула була визнана корисною під час тестування за кількома сценаріями попиту. У [12] була сформульована багатоцільова стратегія контролю тиску та ефективного зменшення втрат у WDN. У стабільному режимі сформульована стратегія призвела до зменшення втрат на 6,15 л/с.

Хоча контроль тиску за допомогою PRV дає задовільні результати, втрата енергії в результаті розсіювання втрати напору викликає серйозне занепокоєння. Це впливає на загальну енергоефективність, оскільки енергія, яка інакше могла б бути перетворена в корисну форму, розсіюється. Використання PRV спільно з насосами було запропоновано в [16] для покращення використання енергії WDN. Спільне планування контролю тиску та рекуперації енергії на основі попиту показало зменшення витоків та споживання електроенергії на насосних станціях. Останнім часом насоси як турбіни (PAT) використовуються як рішення для гібридного контролю тиску та рекуперації енергії. У роботі [17] досліджено регулювання швидкості та тиску ПАТ. Максимальна відновлена при роботі енергія склала 23%. Щоб вибрати відповідні та економічно ефективні програми, ПАТ були запропоновані в [18,19].

2.3 Прилади контролю тиску

Для різних цілей доступні різні пристрої контролю тиску. Їх розміщення у водопровідних мережах залежить від конкретної потреби, що виникає. Вони можуть використовуватися для контролю, обмеження, підтримки або зниження тиску води в трубі або вузлі мережі. У таблиці 1.2 наведено різні типи таких пристроїв і особливості їх використання.

Таблиця 1.2 – Елементи регулювання тиску

Елемент	Використання
Редукційні клапани (PRV Pressure reducing valves)	Регулювання тиску, коли і якщо воно перевищує встановлені значення
Клапани підтримки тиску (PSV Pressure sustaining valves)	Підтримувати певне задане значення тиску
Клапани регулювання тиску (PCV Pressure control valves)	Контролюйте тиск у визначеній зоні управління тиском
Клапан переривника тиску (PBV Pressure breaker valve)	Змусити та підтримувати задану втрату тиску на клапані
Насоси як турбіни (PATs Pumps as turbines)	Регулювання тиску, коли і якщо воно перевищує встановлені значення, і рекуперация енергії.

Загалом, PRV здебільшого використовуються, коли проблема надмірного тиску виникає зі зменшенням попиту в мережі [8]. Однак останнім часом, через дефіцит енергії, PAT були використані для відновлення надлишкових втрат напору та перетворення їх у корисну енергію. Розміщення цих пристроїв настільки ж

важливе, як і їх контроль, щоб забезпечити загальне зниження тиску [30] за мінімальних експлуатаційних витрат.

2.4 Розміщення приладів контролю тиску

У літературі запропоновано різні методи вирішення проблеми розміщення ПРВ. Ці методи можна класифікувати за трьома широкими категоріями, а саме (1) метод підрахунку, (2) метод порівняння тиску та (3) методи, засновані на численні/оптимізації.

2.4.1 Обчислювальний метод

У цьому методі кілька клапанів довільно вставляються у водопровідну мережу. Застосовуються методи оптимізації, які в кінцевому підсумку призведуть до їх оптимальних налаштувань. Цей метод вимагає значних обчислювальних зусиль для досягнення оптимального рішення; однак його легше застосовувати. Робота в [11] використовувала послідовну лінеаризацію вузлових напорів і рівнянь потоку в трубах, щоб мати можливість використовувати лінійне програмування для вирішення проблеми керування клапаном. На 25 вузлах 37 трубної мережі вставлено три засувки. Отримані результати показали, що задача оптимізації потребувала від восьми до 15 ітерацій, щоб отримати оптимальне рішення.

2.4.2 Еталонний метод тиску

Цей клас методів базується на гідравлічному моделюванні. Ідентифікується опорний тиск і виконується гідравлічне моделювання за різних умов попиту. Для всіх моделей попиту місця встановлення вибираються як труби, які задовольняють правило 1.

Rule 1 : if $h_i > h^{ref}$ and $h_j < h^{ref}$

$h_i - h_j > 0,1 \times h^{ref}$

В якості місця установки ПРВ обрана труба.

Тим не менш, у роботі в зроблено висновок, що метод страждав від недоліку, що він не розглядав канали, за допомогою яких $h_i > h^{ref}$, $h_j > h^{ref}$, і їх різниця була трохи більшою. Таким чином, це було пом'якшено запровадженням правила, яке мало на меті перевірити різницю $h_i - h_j$ і розглядало трубу, якщо було виявлено, що вона перевищує порогове значення. Потім правило 2 було включено в методологію, запропоновану [32].

Якщо $h_i - h_j > 0,1 \times h^{ref}$

В якості місця установки ПРВ обрана труба.

Подальше вдосконалення методу еталонного тиску було запропоновано в [33]. Це нещодавнє вдосконалення використало вузловий матричний аналіз, щоб схема була застосована до великомасштабних мереж.

2.4.3 Методи на основі числення/оптимізації

Цей клас методів було вперше розглянуто в для розміщення PRV. Вони запропонували схему, засновану на мінімізації встановленої арматури при мінімізації тиску в системах. Отримане змішане цілочисельне нелінійне програмування було лінеаризовано для реалізації ефективної обчислювальної схеми

для вирішення проблеми. У роботі [30] проблема сформульована як змішана цілочисельна нелінійна оптимізаційна задача (MINLP). Автори запропонували апроксимацію для втрати напору труби, і їх запропонований підхід порівняно з EPANET. Оптимізатор внутрішніх точок (IPOPT) використовувався в [6] для вирішення гібридної проблеми локалізації та керування, сформульованої як MINLP. Їхня формула спрямована на зменшення кількості клапанів, а також на зниження тиску в мережі. Зниження тиску спостерігалось після вирішення їхньої схеми задачі. Подвійна проблема була додатково вивчена та розв'язана за допомогою генетичного алгоритму (GA). Однак раніше в [37] було зроблено висновок, що GA, здається, не пропонує жодних переваг порівняно з безпосереднім вирішенням цілочисельної проблеми. Дослідження щодо розробки стратегій розміщення PAT ще не узгоджено з невеликою кількістю опублікованих робіт. Робота Коельо та Андраде-Кампоса [38] запропонувала використання чисельних інструментів підтримки прийняття рішень для оптимального вибору сайтів для PAT. Ця схема базувалася на задачі оптимізації, сформульованій для максимізації потенційної відновлюваної енергії. Подвійна цільова функція була сформульована в [14] для максимізації відновленої енергії та зменшення обсягу витоків. Для вирішення проблеми оптимізації та визначення оптимальних місць для PAT було обрано оптимізацію роєм частинок.

Таблиця 1.3 Короткий опис класів методів розміщення редуційних клапанів у водопровідних мережах

Метод	Переваги	Недоліки
Обчислювальний метод	Легше застосовувати	Оптимальне розміщення та кількість PRV не можна гарантувати
Метод порівняння тиску	Менше обчислювальне навантаження	Оптимальне розміщення PRV не може бути гарантовано
Методи на основі числення/оптимізації	Оптимальне розміщення, кількість PRV можна гарантувати	Вимогливий до обчислень

Переваги та недоліки трьох класів методів представлені в таблиці 1.3. Варто зазначити, що ці методи, засновані на обчисленні, дали оптимальний метод при високій вартості обчислень порівняно з методом перерахування та методом порівняння тиску.

2.5 Методи контролю тиску

Були розроблені різні стратегії контролю для управління тиском у водорозподільних мережах, а прогрес у стратегіях контролю покращив здатність керувати роботою та ефективністю WDN. Загалом, стратегії контролю, що використовуються в управлінні тиском у WDN, базуються на наступних принципах:

- фіксований регулятор тиску на виході 7 з 17;
- регулювання тиску в часі;
- регулювання тиску з модуляцією потоку;
- регулювання тиску в замкнутому контурі;
- оптимальний контроль тиску

В даний час зусилля спрямовані на схеми управління в реальному часі. Така тенденція діяльності призвела до необхідності вдосконалення схем, таких як експертна, запропонована в [11]. У згаданій експертній схемі точки вимірювання тиску були визначені як змінні стану систем, а точки вимог споживача були порушенням системи. Контрольними змінними експертної системи були окремі насоси на насосній станції. Застосовувана стратегія керування показана в алгоритмі 1, де умова — це послідовність логічної операції порівняння, а висновок — послідовність присвоєння керуючим змінним.

Робота над логічним контролером була додатково розширена для розробки водопостачання постійного тиску [42]. Програмований логічний контролер у поєднанні з частотним перетворювачем використовувався для досягнення постійного тиску подачі води. Недолік цієї системи полягав у тому, що потреба у

воді не є постійною. Тому, застосовуючи постійний тиск на систему, існувала ймовірність надмірного або недостатнього тиску в мережі.

2.5.1 Класична стратегія контролю

Класичні методи керування засновані на одноразовому регулюванні параметрів (On-Off) або ПІД-регуляторів. Їх застосування може бути доцільним для невеликих систем; однак вони все ще можуть застосовуватися в WDN. ПІД-регулятор є загальною стратегією для різних промислових процесів. У [4] запропоновано безпараметричний P-регулятор. Запропонований P-регулятор був заснований на методі проб і помилок для налаштування параметра посилення K_o . Класичний ПІД-регулятор був запропонований [13] для керування насосною системою в WDN для регулювання тиску. Проте в [14] було висловлено занепокоєння щодо його точності керування та можливостей. Питання коливань частоти, які можуть призвести до нестаціонарного тиску в трубопроводі, також піднімалося в [15]. Робота в [16] запропонувала PID для керування PRV для покращення реакції системи на перехідні процеси. Запропонована схема показала покращення реакції мережі.

2.5.2 Розширені стратегії контролю

Оскільки системи, такі як WDN, стають все більш складними, розширені стратегії керування з можливістю керування декількома параметрами одночасно можуть бути доцільними. Для просування роботи, виконаної [12], у [15] було запропоновано двовимірний нечіткий контролер. Відхилення між попередньо визначеним і вимірним тиском у WDN було входом для контролера, а виходом

були команди системи керування. Система на основі нечіткості також використовувалася для операційної оптимізації в [17]. За допомогою цих систем було досягнуто відкриття клапана та управління насосною системою. Тим не менш, вкрай важливо, щоб попередньо визначений тиск регулювався, оскільки потреба в WDN змінюється.

Нечіткі ПІД-регулятори також використовувалися для керування тиском у [44]. Вхідними даними для нечіткого ПІД-регулятора були помилка e та зміна помилки de/dt , як показано на малюнку 3. Самоадаптивні параметри підсилення K_p , K_i і K_d використовувалися контролером для пошуку зв'язку між параметрами ПІД-регулятора та вхідними сигналами. параметри.

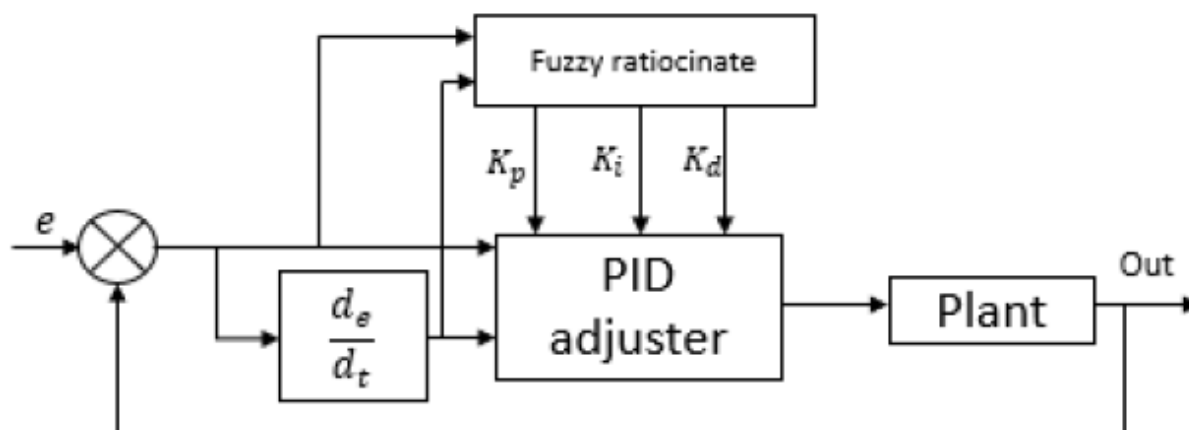


Рисунок 2.1 – Схема прогнозування базової моделі

Адаптивне еталонне керування було запропоновано в [12,18] для досягнення постійного тиску в критичному вузлі системи. Різні автори запропонували модель прогнозного контролю (MPC) для управління тиском у WDN. Значною мірою MPC є корисною технікою керування в різних промислових процесах. Це пов'язано з його здатністю переробляти задачу керування в задачу оптимізації [19] і її корисністю в застосуванні в реальному часі [20,21]. На рис. 4 показані базові ГДК, запропоновані в [14]. Запропонована схема використовувала модель, керовану тиском, для моделювання динаміки WDN.

За результатами вимірювань, проведених у системі WDN, було оцінено тиск і швидкість потоку [5] та об'єднано з оптимізатором. Оптимізатор знайшов оптимальні параметри тиску шляхом мінімізації цільової функції:

$$\begin{aligned} & \text{Min } f(q) \\ & 0 < u_k < 1 \\ & h_i \geq h^{\min} \end{aligned} \quad (2.10)$$

де U_k — індекс контрольного положення PRV,
 h_i — тиск, пов'язаний із вузлом i ,
 h^{\min} — мінімально допустимий тиск,
 q — потік у трубі.

Покращена MPC була розроблена [12] з покращеною моделлю прогнозування. У їхній попередній роботі моделювання розширеного періоду використовувалося як прогностична модель. Однак в останній роботі була використана модель квазістаціонарного стану. В [13] надійно був запропонований відмовостійкий MPC. Конструкція контролера була зроблена таким чином, що після виникнення несправності це не вплинуло на оптимізацію та прогностичні можливості.

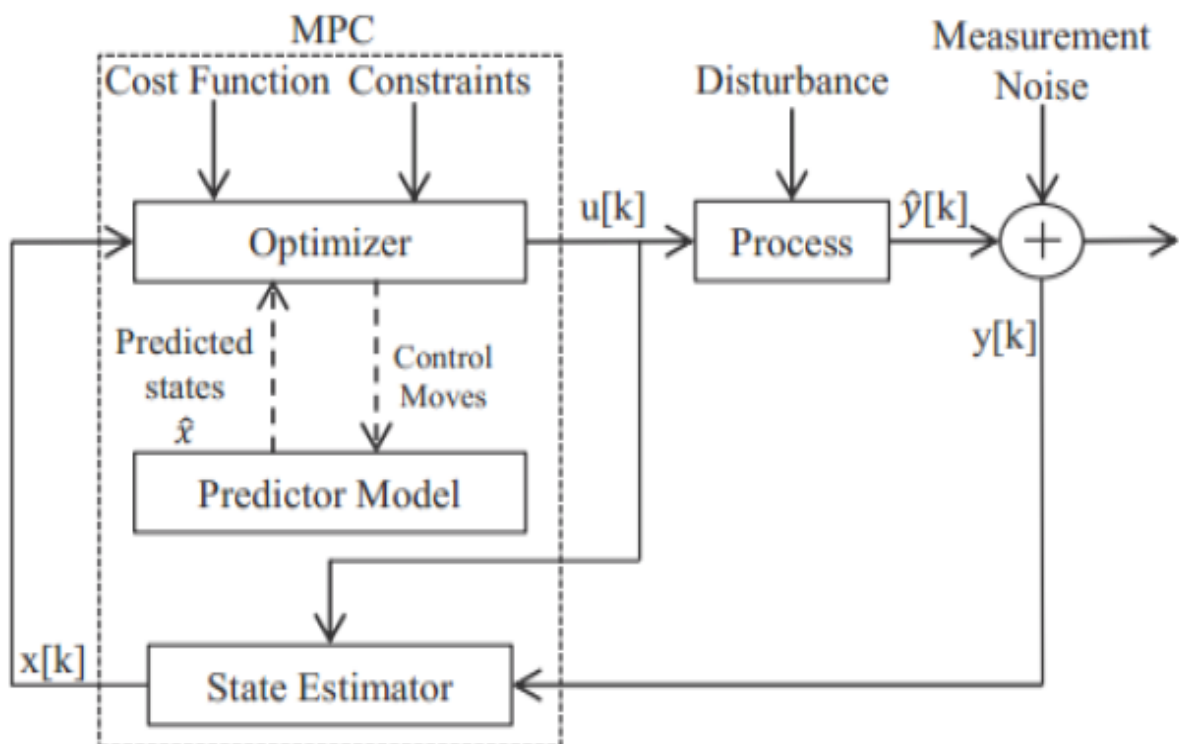


Рисунок 2.2 – Схема прогнозування базової моделі

2.5.3 Оптимальний контроль

Оптимальний контроль тиску у водорозподільчій мережі потрібний для забезпечення мінімізації витоків. Часто оптимізація формулюється так, щоб мінімізувати тиск за кількох вимог. У роботі [19] задача зниження тиску сформульована як нелінійна, невикукла оптимізаційна задача. Дві окремі схеми програмування були запропоновані для апроксимації нелінійності як задачі апроксимованого лінійного програмування. Їхній підхід сприяв покращенню обчислювальної ефективності отримання рішення. Нещодавно в [17] була застосована та сама стратегія, щоб забезпечити реагування на різні графіки попиту. У роботі [10] розглядається проблема оптимального керування тиском шляхом пропозиції квадратичної апроксимації тертя труби. Отриману нелінійну задачу було лінеаризовано, і отримане рішення показало 1% відхилення в порівнянні з EPANET, що зазвичай використовується. Варто зазначити, що лінеаризація задачі в кінцевому підсумку призведе до зниження точності розв'язку.

Задача керування тиском у WDN була вирішена як задача нелінійної оптимізації в [18]. Було помічено, що збільшення PRV в мережі призвело до збільшення обчислювального навантаження, необхідного для вирішення проблеми. Оптимізатор внутрішньої точки (IPOPT) використовувався в [6] для вирішення проблеми MINLP для контролю тиску. Спостерігалось зниження тиску, і оптимізатор зайняв $\sim 4,93$ секунди. Строго можливе послідовне опукле програмування для керування редуційними клапанами було запропоновано в [19]. Запропонована методологія була використана для вирішення сформульованої проблеми НЛП. Результати показали зниження тиску на 3,7%. Задача MINLP була сформульована для максимізації відновленої енергії та контролю тиску в WDN [10]. Схему було протестовано на 25-вузловому тестовому тесті. Результати в [10] показали, що оптимізація може допомогти прийняти рішення щодо встановлення PAT.

Деякі дослідники віддають перевагу використанню метаевристичних методів для вирішення проблем контролю тиску. Звичайні генетичні алгоритми (GA) були використані для знаходження оптимального тиску в WDN [11]. Алгоритм шукав рішення за допомогою адаптивних механізмів, і він був недетермінованим. У роботі [12] GA використовувався для вирішення задачі оптимізації PRV, сформульованої як мінімізація різниці між максимальним і мінімальним тиском у WDN. Їх результати показали, що можна було контролювати аномальні стрибки тиску шляхом оптимального налаштування параметрів PRV. Робота в [13] включила зважений штраф у GA з метою оптимізації роботи WDN. Процедура оптимізації для відновлення енергії та зменшення витоків з використанням GA була розроблена в [14]. Цілі процедури оптимізації були встановлені для максимізації кількості відновленої енергії та відсотка зменшення втрат. У [15] гібридний генетичний алгоритм використовувався для вирішення нелінійного програмування без похідних для оптимального налаштування PAT для контролю тиску. Результати показали, що схема здатна максимізувати енергію, вироблену PAT. Недомінований відсортований генетичний алгоритм використовувався в [3] для розв'язання задач багатоцільової оптимізації. Задачі оптимізації були сформульовані для зменшення кількості використовуваних клапанів, а також для визначення їх оптимальної роботи. Однак, оскільки це були евристичні підходи, глобальна оптимальність ніколи не могла бути гарантована.

Підхід, натхненний музикою, полягав у отриманні оптимальних налаштувань PRV в [17]. Ця методологія показала кращу продуктивність порівняно з генетичними алгоритмами. Техніка продемонструвала час обчислення та скорочення витоків. Іншою схемою, яка показала зменшення обчислювальних зусиль, був метаевристичний підхід пошуку табу, запропонований у [18].

2.5.4 Контроль у реальному часі

Інвестиції в дослідження в режимі реального часу контролю тиску в WDN останнім часом набирають обертів [4]. На відміну від налаштувань тиску під час роботи мережі, ці методи спрямовані на визначення найкращого налаштування тиску за безперервними вимірюваннями, які проводяться. На підставі вимірювань пристрої контролю тиску (PCD) у WDN регулюються відповідним чином, враховуючи вимоги, які повинні бути задоволені. Стратегії контролю тиску в режимі реального часу можуть базуватися на класичних або вдосконалених стратегіях контролю.

У роботі [9] запропоновано алгоритм логічного керування для пом'якшення надмірного та недостатнього тиску, який може існувати в мережі. Їхня стратегія керування припускала, що бажане задане значення п'єзометричної висоти h_{sp} відомо. Відхилення п'єзометричної висоти $h(t)$ від заданого значення потім було використано для розрахунку зміни $\Delta a(t)$ налаштування закриття а клапана.

Дистанційне керування в реальному часі клапаном регулювання тиску (PCV) наразі є передовим методом керування тиском у WDN [4]. Ця техніка дозволяє збирати дані з усіх вузлів мережі, включаючи ізольовані/віддалені вузли. Пропорційні (P) контролери використовувалися в [3, 4], а в [10] програмоване логічне керування використовувалося для досягнення дистанційного керування тиском у реальному часі. Інтегральний контролер (I) $C(s) = \frac{K_i}{s}$ використовувався в [11] для регулювання тиску шляхом контролю PRV в WDN. Лабораторні експерименти були використані для перевірки можливостей зазначеного контролера.

Системи диспетчерського контролю та збору даних (SCADA) [12] у поєднанні з генетичним алгоритмом були схемою, запропонованою в [13] для забезпечення того, щоб рівні тиску підтримувалися в прийнятних межах. Запропонована схема використовувалася в режимі реального часу з додатком до WDN.

2.5.5 Контроль без моделі

Безмодельне керування (MFC) — це концепція, яка інкапсулює методи, які часто застосовуються для керування складними системами, використовуючи ультралокальну модель мережі (спрощене представлення). Схема MFC не потребує явного рішення моделі для керування маніпуляційними змінними систем. Загалом, вони використовуються, щоб уникнути складних обчислень, які пов'язані з нелінійною системою, оцінка яких часто є дорогою. Хамам і Хінді запропонували використовувати здатність нейронних мереж (NN) для опису нелінійності та розробили емулятор для процедури оптимізації. Це продемонструвало зменшення обчислювального навантаження для контролю PRV для мінімізації тиску, а також спостерігалось значне зменшення витoku. Підхід, прийнятий у [15], полягав у імітації гідравлічного рішення WDN. Отриманий емулятор потім було підключено до GA для визначення відповідних налаштувань PRV. Незважаючи на те, що схеми були в змозі керувати PRV без явного рішення гідравлічної моделі, зміна в топології системи зробила б їх абсолютними.

2.5.6. Порівняння методів контролю

У таблиці 2.4 наведено зведення методів контролю. Резюме включає обмеження схем та їх відповідне застосування. У таблиці 5 наведено внески з деяких розглянутих літературних джерел. Різні розглянуті аспекти включають стратегію контролю, дослідження періодів і включення невизначеностей. З таблиці 2.4 видно, що оцінка моделей контролю не враховувала невизначеності попиту.

Таблиця 2.4 – Короткий опис методів контролю, які зазвичай використовуються для контролю тиску в водорозподільних мережах

Техніка	Операційна стратегія	Ремарки	Обмеження	Використання	Класифікація
Класичний контроль	Базується на одноразовому управлінні параметрами (Вкл-Вимк) або ПД-регуляторів	Економічно ефективно та просте впровадження, однак не підходить для великомасштабних WDN	Контроль одного параметра за раз	Підходить для невеликих систем	На основі фізичної моделі
Розширений контроль	Для імітації поведінки системи потрібна модель. Базуючись на попередніх знаннях про вимоги в системі, ці контролери коригують контрольовану змінну, щоб зменшити похибку між еталонною та необхідною величинами.	Їх реалізація громіздка, а точність моделі визначатиме точність результатів.	Складність їх реалізації	Підходить для великих мереж	На основі фізичної моделі

Продовження табл.2.4

Техніка	Операційна стратегія	Ремарки	Обмеження	Використання	Класифік
Оптимальний контроль	На основі принципів обчислення вибираються найкращі робочі параметри. Ці параметри можуть бути обрані з різними обмеженнями або взагалі без обмежень.	Вимоги до обчислень цього класу методів виявилися дуже громіздкими. Тому цей метод може бути не ідеальним для програм реального часу.	Обчислювальні ресурси обмежують кількість керуючих змінних у додатках із часовими обмеженнями	Для великих мереж	На основі фізичної моделі
Контроль у реальному часі	На основі вимірювань, отриманих у режимі реального часу через SCADA або іншу програму, застосовується закон керування та створюються необхідні інструкції з налаштування	Щоб запустити ці системи, потрібні значні капіталовкладення	Закони керування, які можуть бути застосовані, обмежені наявною потужністю обробки	Може використовуватися в будь-яких системах, де доступна інфраструктура реального часу	На основі фізичної моделі
Контроль без моделі	На основі використання емуляторів для імітації моделі обраного закону керування	Для реалізації точного емулятора потрібен великий набір навчальних даних	Проблеми адаптації згаданого емулятора при зміні топології мережі	Підходить для мережі з мінімальними змінами в топологічному дизайні	На основі даних

3 РЕАЛІЗАЦІЯ ОПТИМІЗОВАНОЇ СИСТЕМИ РОЗПОДІЛУ ВОДИ

3.1 Вибір бездротові мережі для оптимізованої системи розподілу води

Проблеми зв'язку полягають у вимогах до потужності та середовищі передачі, через яке передаються сигнали. На високих частотах на передачу сигналу через зволене середовище сильно впливає ослаблення сигналу. Тому ключовою проблемою є бездротовий зв'язок між датчиками та передача сигналу від датчиків.

3.1.1 Bluetooth Low Energy

Технологія Bluetooth також дуже відома, оскільки вона використовується в багатьох пристроях, таких як телефони, слухові апарати або камери. При використанні для IoT розглядається версія BLE (Bluetooth Low Energy), яка є специфікацією, спрямованою головним чином на невеликі програми IoT, такі як портативні пристрої, які вимагають надсилання невеликих даних з мінімальним енергоспоживанням. BLE забезпечує швидкість передачі даних трохи менше 1 Мбіт/с і працює в неліцензованому діапазоні 2,4 ГГц, що ідеально підходить для використання в приміщенні та на коротких відстанях, а також з необмеженою кількістю вузлів, на відміну від традиційного Bluetooth.

3.1.2 Вузкосмуговий IoT

Це технологія, яка просувається 3GPP (3rd Generation Partnership Project) через операторів мобільного зв'язку та великих виробників, таких як Huawei, Ericsson або Nokia, щоб задовольнити потреби в зв'язку IoT. NB-IoT використовує діапазони стільникового зв'язку та розроблений для роботи в діапазоні LTE з використанням

інтервалу між каналами LTE, захисними діапазонами, щоб максимально використати спектр зв'язку.

3.1.3 Мережі LoRaWAN

LoRaWAN — це бездротова технологія для малопотужних глобальних мереж. Назва, LoRa, є посиланням на дальні канали передачі даних, які дозволяють цій технології здійснювати дальні зв'язки на відстані до п'яти кілометрів у містах і до 15 кілометрів або більше в сільській місцевості з прямою видимістю. Ключовою особливістю рішень на основі LoRa є низькі вимоги до електроенергії, що дозволяє створювати пристрої з живленням від акумуляторів, які можуть працювати до 10 років. Технічні характеристики цієї технології зведені в таблицю 3.1.

Таблиця 3.1 – Функції LoRaWAN

Характеристики	Параметри
Стандарт	LoRaWAN
Частотні діапазони	Не потребують ліцензії 433/868/915 МГц
Ширина діапазону	125кГц/500кГц
Максимальна швидкість передачі.	250біт/с – 50кбіт/с
Радіус покриття	< 15 км
Проникнення	Високе проникнення
Споживання енергії	Дуже низьке споживання енергії

У мережі LoRaWAN вузли не пов'язані з одним конкретним шлюзом, але можуть бути отримані кількома шлюзами. Кожен шлюз буде перенаправляти отриманий пакет від кінцевого вузла до мережевого сервера за допомогою зворотного зв'язку (стільникового зв'язку, Ethernet, супутника або Wi-Fi) (рис. 3.1). Мережевий сервер відповідає за інтелектуальність і складність системи, керує

мережею та фільтрує надлишкові отримані пакети, реалізує засоби контролю безпеки.

Веб-додатки дозволяють пристроям IoT зберігати дані, які вони генерують, не займаючи місце на фізичних серверах. Будучи розподіленою структурою і незалежною від однієї організації, вона забезпечує велике резервування та ефективні системи безпеки для бізнесу, полегшуючи впровадження IoT.

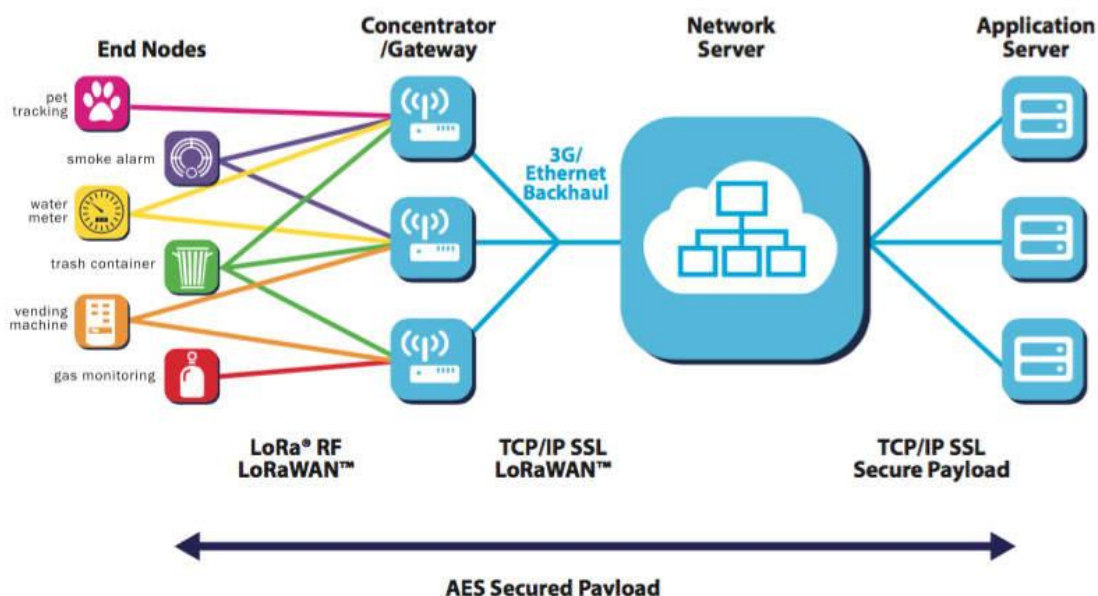


Рисунок 3.1 – LoRaWAN архітектура

Хмарні сервери IoT дозволяють легко спілкуватися з сенсорними вузлами, керувати ними та інтегрувати їх із програмами. Якщо взяти до уваги різні типи апаратного забезпечення, підключення та датчиків, інструмент, який дозволяє вносити зміни, ескалувати процеси та реагувати на інциденти централізованим способом, стає важливим.

У цьому дослідженні необхідно використовувати датчики вимірювання витрати та електромагнітні клапани для контролю проходження та блокування певного контуру води. Крім того, даними, отриманими датчиками, керують вузли, які інтегрують мікроконтролер для здійснення передачі даних в Інтернет за допомогою LoRaWAN.

Таблиця 3.2 – Особливості бездротових технологій

Технологія	Швидкість	Покриття	Споживання
Quality	низька	широке	Дуже низьке
WiFi	висока	низьке	низьке
BLE	низька	низьке	Дуже низьке
ZigBee	низька	низьке	низьке
NB-IoT	низька	широке	Дуже низьке
SigFox	Дуже низька	широке	Дуже низьке
LoRaWAN	низька	широке	Дуже низьке



Рисунок 3.2 – Функціональна структура системи

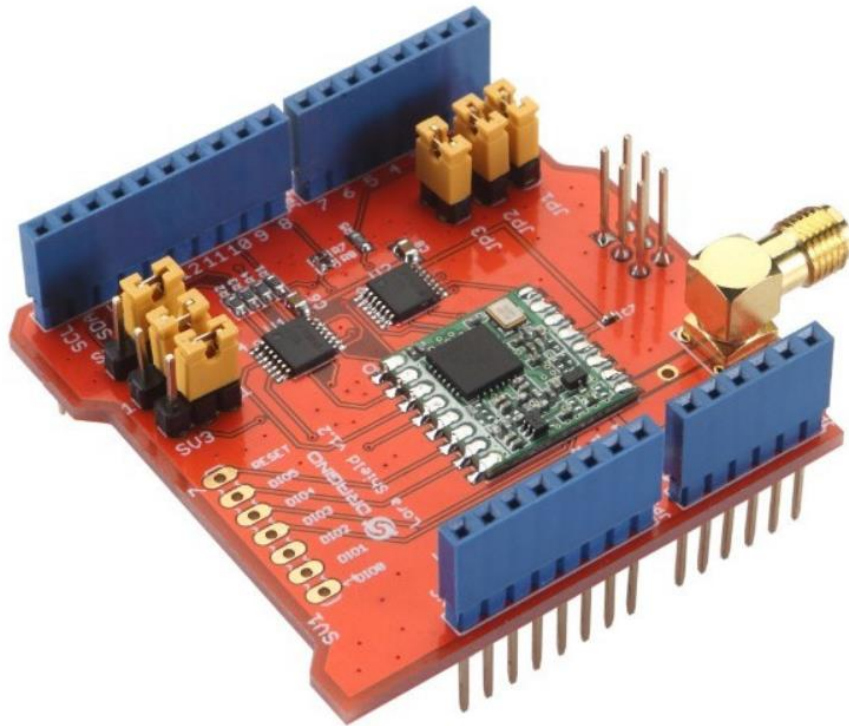


Рисунок 3.3 – Модуль Dragino LoRa

У випадку технології передачі даних використовуються рішення LPWAN, які забезпечують альтернативу, яка охоплює широкий діапазон покриття, низьке енергоспоживання та низьку вартість, вибираючись на основі порівняльного дослідження з іншими рішеннями (табл.3.2).

На ринку існує широкий вибір моделей мікроконтролерів відповідно до кожного випадку використання. У цьому випадку дослідження було проведено серед тих, які доступні на місцевому ринку і які є толерантними до 5 вольт, оскільки це напруга, сумісна з більшою кількістю датчиків і приводів, які використовувалися в цьому дослідженні, вибравши карту Arduino UNO. Крім того, для забезпечення пропускну здатності карти Arduino вибрано одну з найвидатніших плат у галузі технології LoRa під назвою Dragino (рис. 3.3), яка дозволяє нам досягати надзвичайно великих діапазонів передачі на низьких швидкостях. передачі.

Dragino LoRa Shield — це трансивер великої дальності у форм-факторі Arduino shield і заснований на бібліотеці з відкритим вихідним кодом. LoRa Shield дозволяє користувачеві надсилати дані та досягати надзвичайно великих відстаней на низькій швидкості передачі даних. Він забезпечує наддалекий діапазон

поширення спектру. зв'язок і висока перешкодостійкість при мінімізації споживання струму.

LoRa Shield на основі SX1276/SX1278 націлений на професійні додатки бездротової сенсорної мережі, такі як іригаційні системи, розумне вимірювання, розумні міста, виявлення смартфонів, автоматизація будівель тощо.

Використовуючи запатентовану техніку модуляції Semtech LoRa™, LoRa Shield може досягти чутливості понад -148 дБм, використовуючи недорогий кристал і список матеріалів. Висока чутливість у поєднанні з інтегрованим підсилювачем потужності +20 дБм забезпечує найкращий у галузі бюджет зв'язку, що робить його оптимальним для будь-яких застосувань, які вимагають діапазону чи надійності. LoRa™ також забезпечує значні переваги як у блокуванні, так і в селективності порівняно зі звичайними методами модуляції, вирішуючи традиційний компроміс між діапазоном, стійкістю до перешкод і споживанням енергії.

Ці пристрої також підтримують режими високої продуктивності (G)FSK для систем, включаючи WMBus, IEEE802.15.4g. LoRa Shield забезпечує винятковий фазовий шум, вибірковість, лінійність приймача та ППЗ для значно нижчого споживання струму, ніж конкуруючі пристрої.

3.2 Вибір датчиків системи

Система використовує датчики витрати, які використовуються для вимірювання різних рідин (води, палива, масла) і різних об'ємів з більшою чи меншою точністю. Відповідно до дослідження, проведеного на доступних датчиках, було прийнято рішення вибрати той, який має більший тиск і більший розмір з'єднувальних ниток, вибравши датчик YF-S201 (табл. 3.3). Усі датчики використовують магніт, розташований у турбіні, який генерує позитивний імпульс щоразу, коли він проходить через датчик Холла. Таким чином можна отримати кількість обертів пропелера за хвилину, а потім обчислити потік води.

Таблиця 3.3 – Порівняння датчиків витрати

	YF-S401	YF-S201	FS300A
Діаметр труби для приєднання	1/4"	1/2"	3/4"
Потік	0.3 а 6 л/хв	1 а 30 л/хв	1 а 60 л/хв
Тиск (Макс)	0.8 МПа	1.75 МПа	1.2 МПа
Напруга живлення	DC 5—18 В	DC 5—18 В	DC 5—18 В
Температура	< 80°C	< 80°C	< 80°C

YF-S201 є датчиком витрати води, який призначений для вимірювання потоку рідини.

Даний датчик виконаний в пластиковому корпусі, в якому знаходяться: лопасті з вбудованим магнітом і датчик Холла. YF-S201 генерує близько 450 імпульсів на літр. При проходженні води через датчик, лопасті починають обертатися і датчик Холла фіксує кожну зміну полярності магніту. Таким чином, чим вище швидкість потоку води, тим більше імпульсів на виведенні датчика. Вихідні імпульси відповідають об'єму води. Максимальний об'єм проточної рідини в хвилину становить 30 л, а тиск не повинен перевищувати 2 МПа.



Рисунок 3.4 – Датчик YF-S201

Підключається шланг до датчика YF-S201 за допомогою гайки різьбою 1/2 дюйма. При підключенні датчика слід звернути увагу на стрілку, яка повідомляє про напрямок потоку води. Підключається датчик до мікроконтролерного пристрою за допомогою 3 виводів:

- VCC (червоний провід): напруга живлення
- GND (чорний провід): «земля»
- OUT (жовтий провід): вихідні імпульси.

Що стосується платформ IoT, наразі існує висока доступність рішень, які пропонують функції зберігання та візуалізації даних для наскрізного рішення IoT. Платформа облікових записів Ubidots дозволяє аналізувати та обробляти дані, програмувати події, аналізувати дані та виконувати автоматичне виконання дій. Ця платформа також сумісна з різними пристроями, такими як Arduino, Raspberry Pi, ESP, Particle тощо. Саме з цих причин її було обрано для реалізації системи.

Було реалізовано два типи вузлів: (i) вузол кінцевого користувача, який був розташований за місцем проживання кожного клієнта водопостачання для вимірювання витрати та споживання, та (ii) адміністративний вузол, метою якого є контроль потоку води, дозволяючи пропуск води, перекриття та облік.

Кожен вузол кінцевого користувача має витратомір YF-S201, внутрішній ротор якого генерує імпульси, що надсилаються на мікроконтролер, розміщений на платі Arduino Uno. За допомогою програми, написаної на мові C, виконується розрахунок витрати та споживання води. Згодом ці дані надсилаються до модуля Dragino LoRa Shield для передачі на пристрій Gateway Lora. Адміністративний вузол схожий на описаний вище, але має електромагнітний клапан для дистанційного керування потоком води по певних ділянках мережі. У цьому випадку зв'язок через технологію LoRa є двонаправленим, і для живлення електромагнітного клапана потрібне джерело напруги 12 В на додаток до батареї на 6 В, яка живить решту ланцюга.

Внутрішні лопатки ротора датчика YF-S201 повністю ізольовані, щоб запобігти витокам води, а поза камерою він має датчик Холла, який дозволяє виявляти магнітне поле, створене магнітом, лопатками та рух камери. ротор. Коли

вода циркулює через корпус витратоміра, вона обертає турбіну всередині нього, а магніт, розташований у турбіні, генерує позитивний імпульс кожного разу, коли він проходить повз датчик Холла. Таким чином ви можете дізнатися кількість обертів пропелера за хвилину, а потім обчислити потік води.

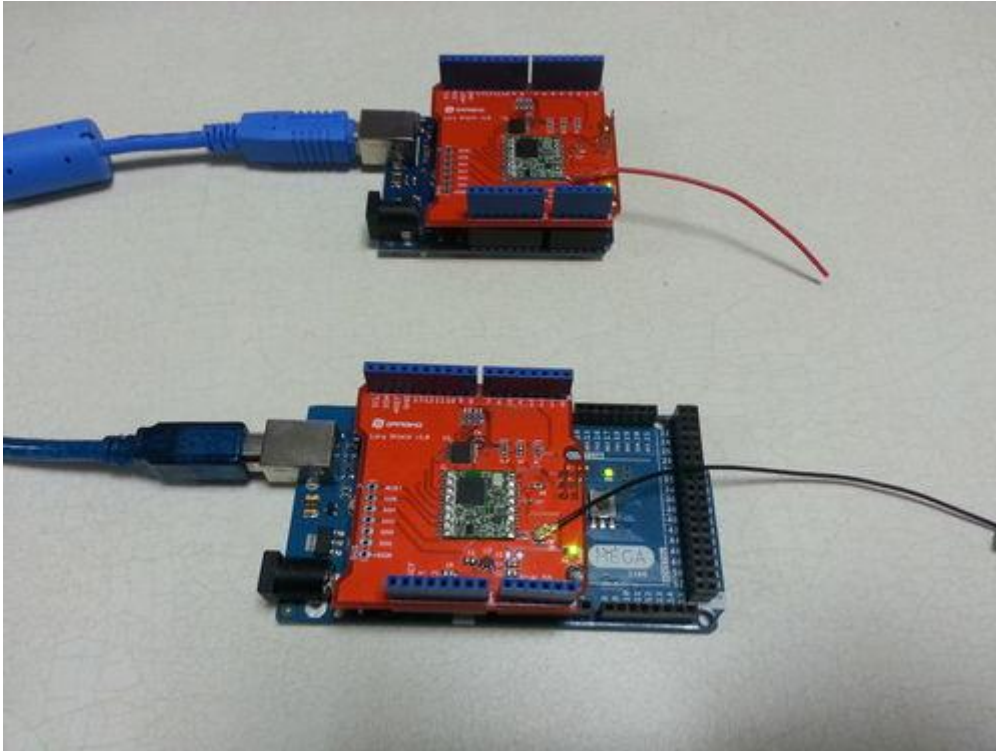


Рисунок 3.5 – Перевірка зв'язку між вузлами

Датчик потоку використовує ефект Холла для вимірювання потоку відповідно до рівняння: $f \text{ (Гц)} = 7,5 \times Q \text{ (л/хв)}$, де змінна f — це частота генерованого сигналу, а Q — кількість води за хвилину, з коефіцієнтом перерахунку 7,5. Розроблено алгоритм, який зчитує імпульсний сигнал датчика в часовому діапазоні « t » 5 секунд. Схема потоку (3.8) показує, як розраховується об'єм води, виходячи з витрати, помноженої на різницю часу відбору проб потоку води.

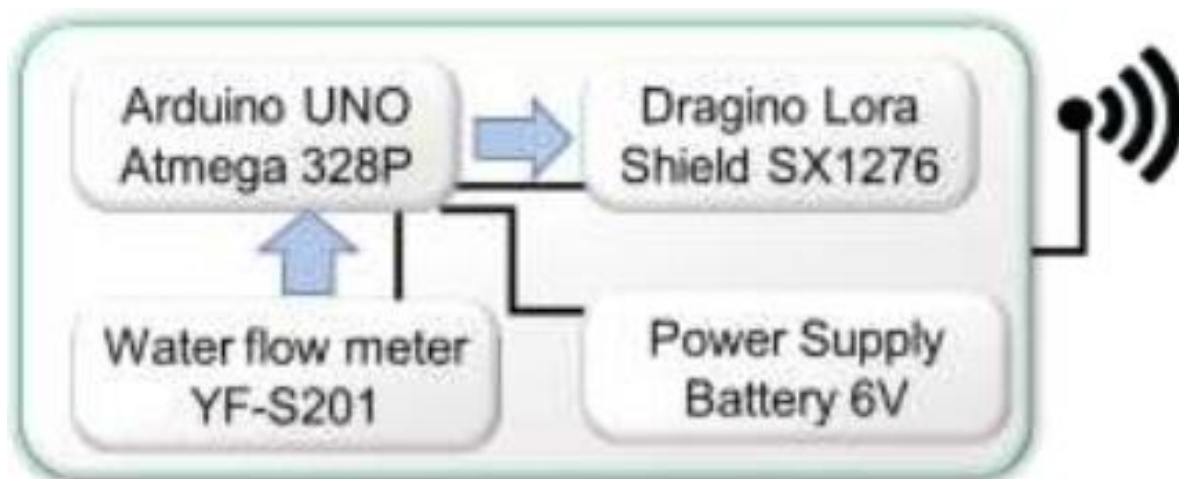


Рисунок 3.6 – Діаграма вузла кінцевого користувача.

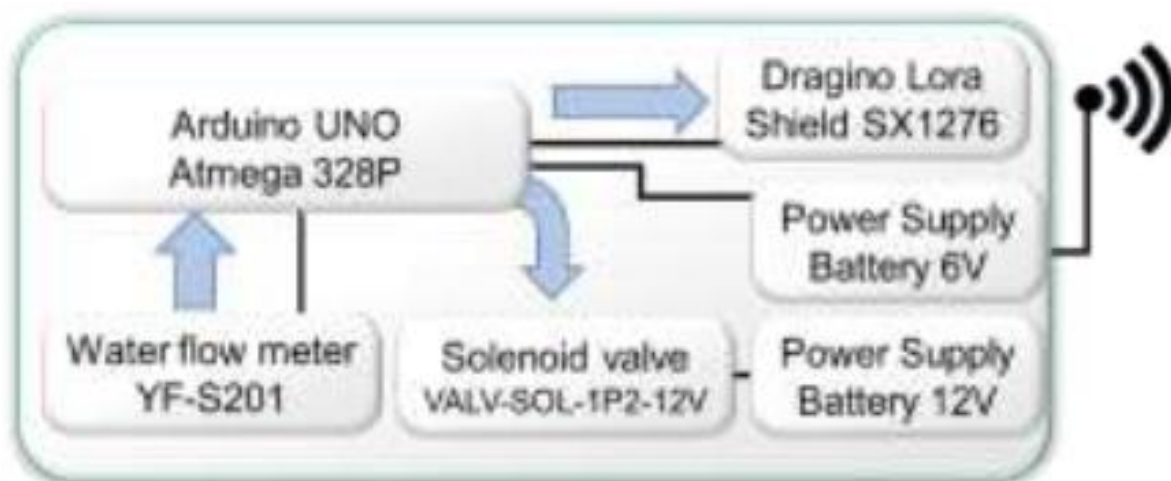


Рисунок 3.7 – Блок-схема адміністративного вузла



Рисунок 3.8 – Розрахунок витрати води

3.3 Передача даних

Цей процес виконується в двох видах сенсорних вузлів, описаних вище. Для цього використовується плата Arduino Uno разом із картою Dragino Lora для встановлення зв'язку з модулем Gateway на частоті 915 МГц. Для управління модулем передачі використовується бібліотека «LoRa.h» і функції передачі

«LoRa.print» і «LoRa.begin» для будь-яких типів даних. Реалізований вузол кінцевого користувача (рис. 3.9) надсилає інформацію на системний шлюз кожні 5 секунд.



Рисунок 3.9 – Вузол кінцевого користувача

3.4 Керування електромагнітними клапанами

Доведено, що регулювання тиску води в трубах є важливим інструментом довгострокового зменшення втрат у водорозподільних мережах. Таким чином, схема управління тиском є важливим аспектом водопровідних мереж і була темою обговорення в останні роки. У більшості мереж активний контроль тиску для мінімізації втрат шляхом зменшення надлишкового тиску води є важливим. Існує ряд методів регулювання тиску в WDN. Вони включають використання контролерів насосів зі змінною швидкістю, таких як Aquavar e-ABII виробництва Xylem Gould Water Technology, і використання резервуарів тиску розриву. Крім того, регулювання тиску води в розподільчих мережах зазвичай досягається шляхом поділу складних мереж на менші підмережі, відомі як районні вимірювальні зони

(DMA) або зони управління тиском (PMA). Тиск води в цих зонах регулюється встановленням елементів мережі, таких як регулюючі клапани на вході в зону(и). Було розроблено кілька високорівневих регулюючих клапанів, які розгортаються на трубах або для контролю тиску води, або для контролю потоку води в певних точках мережі.

Ці регулюючі клапани включають, але не обмежуються ними:

- редуційні клапани (PRV Pressure reducing valves), що використовуються для обмеження тиску в ланках трубопроводів;
- клапани підтримки тиску (PSV Pressure sustaining valves), які використовуються для підтримки тиску на певному значенні;
- клапани регулювання тиску (PCV Pressure controlling valves), призначені для регулювання тиску в певній зоні водопровідних мереж;
- клапан вимикача тиску (PBV Pressure breaker valve), який використовується для форсування заданої втрати тиску на клапані.

Нещодавнє поширення технології керування, що призвело до появи нової парадигми в управлінні клапанами, опція для більш складного контролю тиску різко зросла за останні роки. Тиск води в мережі зазвичай регулюється шляхом встановлення регулюючих клапанів, здебільшого PRV, на вході PMA або DMA або в інших зонах, де спостерігаються високі частоти спалахів або високі рівні витoku. В результаті тиск води в зоні можна регулювати за допомогою роботи ПРВ.

Управління електромагнітним клапаном 12 В (модель VALV-SOL-1P2-12V) здійснюється адміністративним вузлом, який має привід, керований за допомогою вихідного контакту з апаратного забезпечення Arduino для активації або дезактивації. Схема заснована на реле 5 В, яке замикає ланцюг, який живить електромагнітний клапан від джерела 12 В. Оскільки реле має мінімальний робочий струм 70 мА, необхідно буде використовувати підсилювач струму, використовуючи транзистор моделі 13002 (рис. 7). Процес керування запускається через контакт 5 Arduino для введення цифрового сигналу для ввімкнення клапана. Транзистор 13002 має коефіцієнт підсилення 10, достатній для гарантування мінімального робочого струму 70 мА. Це обчислюється за допомогою резистора 550 Ом, що забезпечує

колекторний струм 78 мА, достатній для ввімкнення реле та запуску електромагнітного клапана. Цей процес контролюється мікроконтролером, який активує електромагнітний клапан, коли він отримує вказаний сигнал від системного шлюзу.



Рисунок 3.10 – Електронний клапан VALV-SOL-1P2-12V

Електромагнітний клапан активується, коли вказаний сигнал отримано від шлюзу системи через бездротовий зв'язок LoRa. Адміністративний вузол використовує команду “LoRa.receive()” для отримання даних від шлюзу. Якщо на упаковці є повідомлення «LOW», контакт 5 перейде в низький стан (0 В), а якщо на ньому є повідомлення «HIGH», він перейде в високий стан (5 В), увімкнувши електромагнітний клапан. У цьому випадку 6 В використовується для апаратних модулів і 12 В для схеми електромагнітного клапана.

3.5 Шлюзові модулі

Шлюз має інтерфейс зв'язку WiFi через модуль ESP8266, яким керує карта Arduino для передачі інформації від вузлів датчиків до серверів IoT у хмарі. Його

функції включають отримання повідомлень від IoT-сервера та надсилання їх до вузлів через LoRa для виконання дії на електромагнітному клапані (рис. 3.10).

Веб-сервіс Ubidots використовується для отримання даних, про які шлюз надсилає та отримує інформацію за допомогою змінних, зареєстрованих у веб-платформі через API Ubidots REST

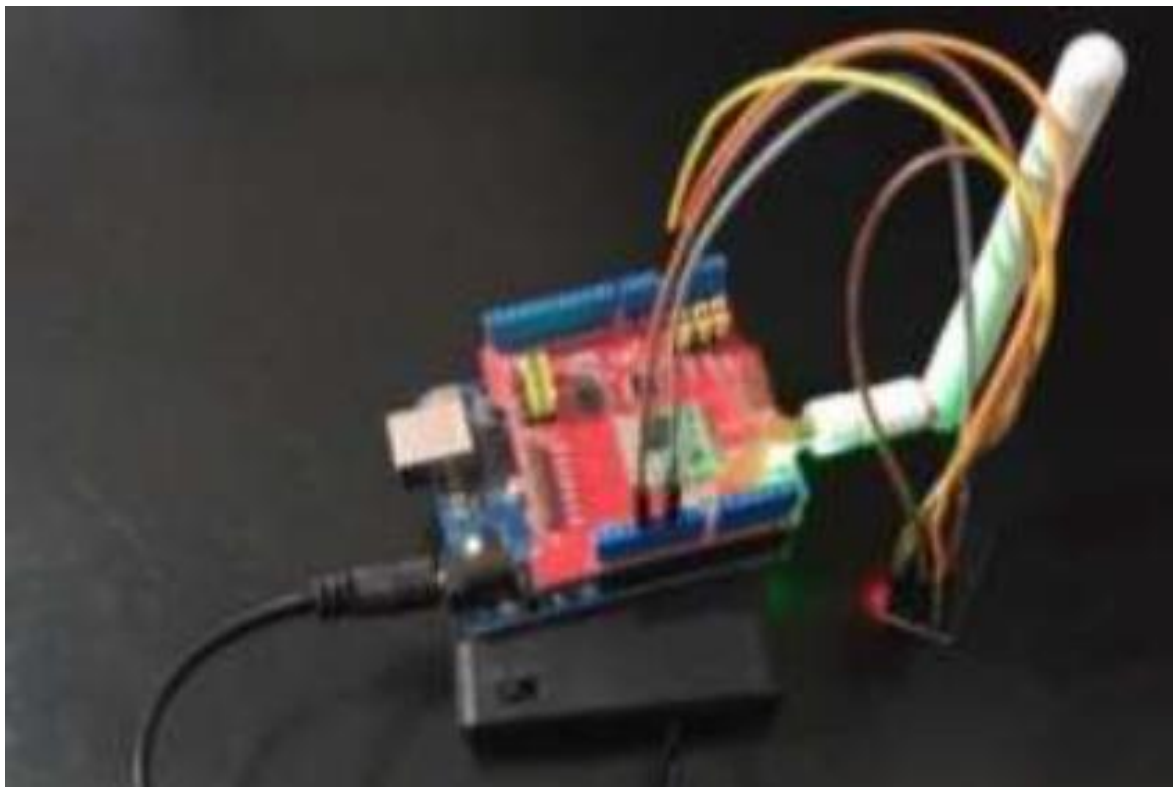


Рисунок 3.11 – Шлюз LoRa

4 СЕРВЕРНЕ ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ ОБРОБКИ ТА ТЕСТУВАННЯ СИСТЕМИ

4.1 Налаштування серверного програмного забезпечення

Для того, щоб не витратити час на створення власного хмарного сховища та не писати сервер обробки даних особливо враховуючі потенціально великий об'єм точок передачі інформацію було використане спеціальне готове рішення Ubidots.

Для використання в нашій системі Ubidots необхідно виконати налаштування.

Створення HTTP-інтеграції. Для надсилання даних з Ubidots на пристрій (керування низхідними посиланнями)

Повідомлення низхідного каналу зазвичай керують активацією пристроїв, частотою оновлення пристроїв тощо. У цьому випадку ми збираємося налаштувати низхідні повідомлення, щоб увімкнути клапан через Ubidots.

Щоб це зробити, потрібна друга інтеграція, але в цьому випадку інтеграція HTTP. Необхідно виконати наступні кроки, щоб створити інтеграцію:

- в огляді програми обрати опцію «Інтеграція», розташовану у верхньому правому куті сторінки.
- у розділі інтеграції прокрутити вниз до пункту «HTTP Integration».

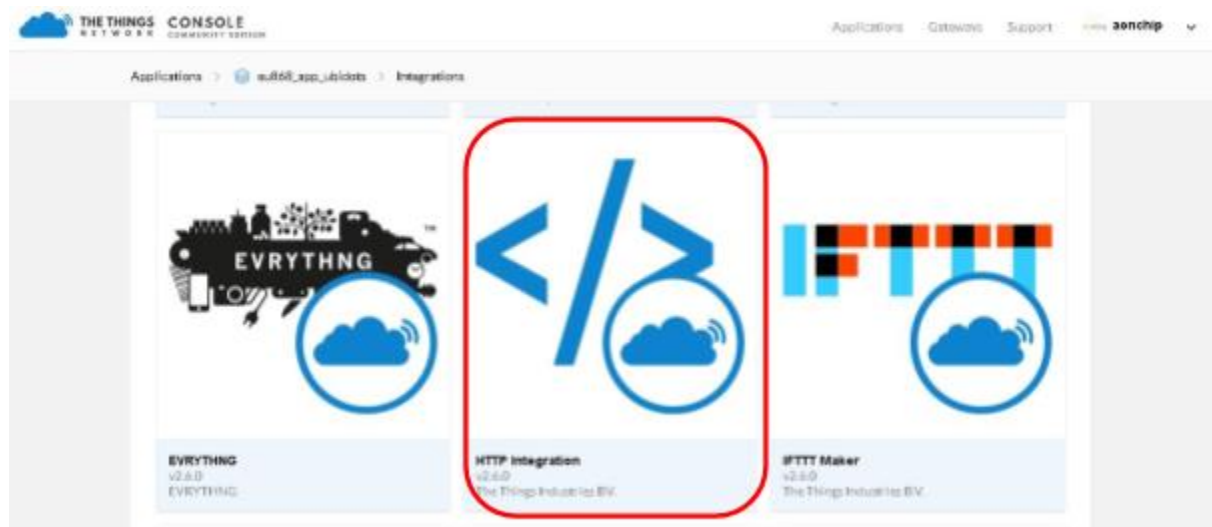


Рисунок 4.1 – Ubidots інтеграція

Тепер, коли все налаштовано в TTN, можна керувати даними двонаправлено за допомогою Ubidots і своїх пристроїв WaterSens через LoRaWAN.

Необхідно перевірити створення пристроїв WaterSens у обліковому записі Ubidots

Для цього треба відкрити обліковий запис Ubidots і у верхній центральній частині сторінки виберіть опцію «Пристрої > Пристрої». У цьому розділі ви побачите створений новий пристрій, пов'язаний з DeviceEUI, призначеним пристрою, зареєстрованому в TTN.

Ubidots пропонує гарні попередньо визначені віджети для додавання ваших даних на загальну інформаційну панель. Ці віджети можна асоціювати зі змінними, визначеними користувачем для кожного пристрою.

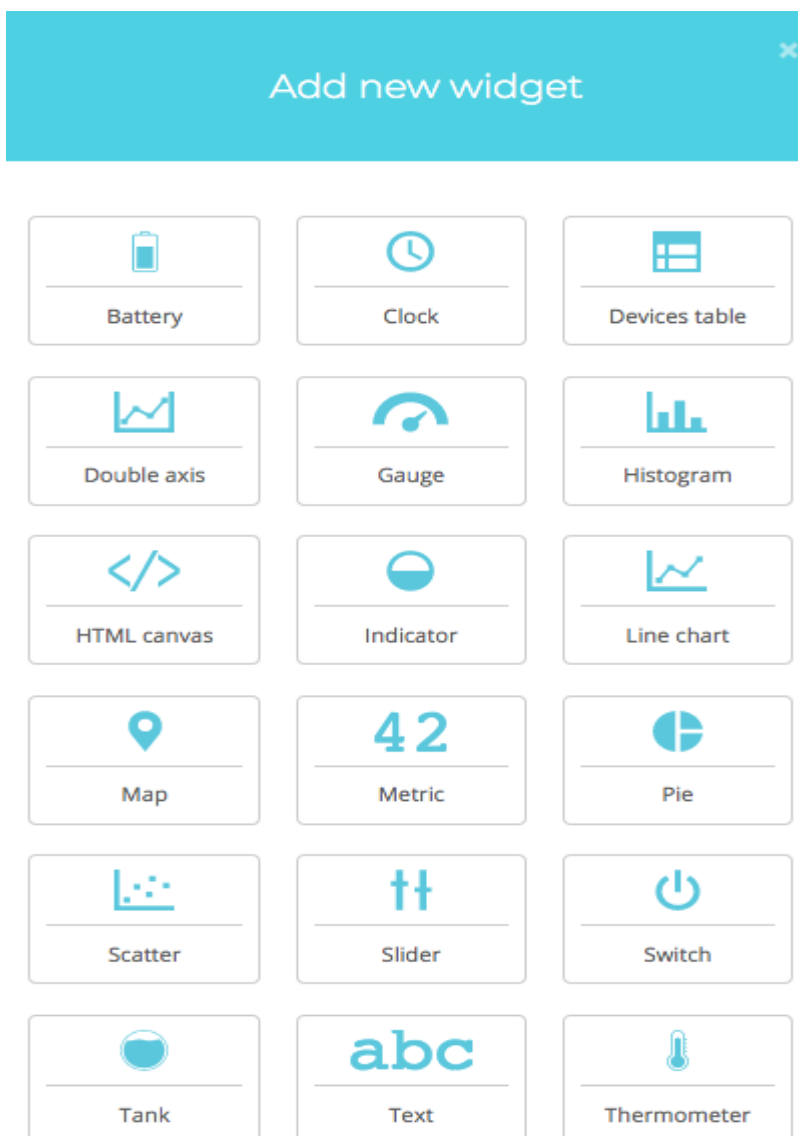


Рисунок 4.2 – Готові віджети Ubidots

Дані можна відобразити в інтуїтивно зрозумілому графічному режимі.

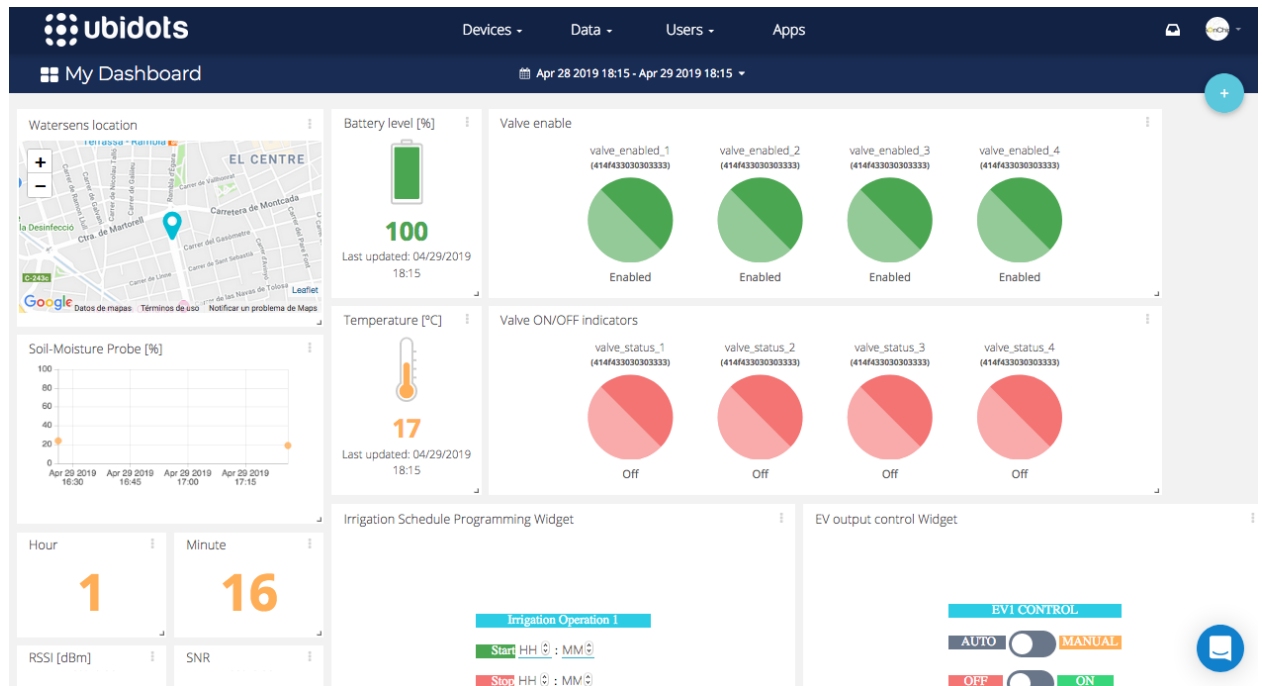


Рисунок 4.3 – Графічне відображення даних в Ubidots

4.2 Перевірка роботи системи

Було проведено валідацію системи, побудованої через структуру, яка імітує водорозподільну мережу з використанням 1/2" трубних контурів. Вузол встановлюється біля джерела питного водопостачання кожного будинку разом із датчиком потоку YF-S20. З іншого боку, модуль Gateway розташований на нижньому поверсі тестової зони, і завдяки хорошій проникності сигналу бездротовий зв'язок не створює проблем.

У тестах вузол увімкнено, і генерується постійний потік води, що виконує процес передачі даних до веб-сервісу Ubidots. Дані спостерігаються за допомогою графіка, горизонтальна та вертикальна осі якого представляють час і витрату, виражені в літрах на хвилину. Один із способів візуалізації даних — за допомогою онлайнної динамічної таблиці, вказуючи прочитане значення та дату взяття зразка, де повідомлення надходить на сервер кожні 20 секунд. Це пов'язано з

конфігурацією шлюзу, який працює в двонаправленому режимі під час зв'язку з сервером, маючи можливість змінювати діапазон вибірки, щоб мати показання щохвилини.

Випробування адміністративного вузла проводилися з використанням моделі розміщення електромагнітного клапана та датчика потоку в схемі розподілу води. Цей вузол було включено та перевірено зв'язок із сервером для дистанційного керування клапаном.



Рисунок 4.3 – Розгортання вузла кінцевого користувача



Рисунок 4.4 – Тести адміністративного вузла

Тести керування клапаном проводилися з сервера, перевіряючи зміну швидкості потоку, зареєстровану датчиком, де веб-інтерфейс має кнопку керування для запобігання потоку води. Сервер показував наявність зареєстрованої витрати, поведінка якої показує більш високий тиск у контурі трубопроводу, а потім його зниження.

Важливість адміністративного вузла в системі розподілу питної води ґрунтується на внеску оператора в моніторинг потоку в секціях для управління водопостачанням. Таким чином, можна оцінити значення нормального потоку звичайного дня, аналізуючи зібрані дані та спостерігаючи за графіками, отриманими на веб-платформі, що дозволяє виявити можливі витіки. Крім того, увага до такого типу події мала б набагато коротший час реагування, зменшуючи економічні втрати через недоотримання води.

У разі використання технології Lora це дозволило мати записи протікання та дистанційне керування закриттям та відкриттям ділянки мережі у разі будь-яких небажаних подій. Ця технологія має велику дальність з мінімальним енергоспоживанням для передачі між вузлом і реалізованим шлюзом. Крім того, датчик витрати YF-S201 ідеально підходить для водорозподільних мереж у житлових приміщеннях.

ВИСНОВКИ

В магістерській роботі проведено розробку методів оптимізації роботи бездротової системи моніторингу споживання води шляхом використання технології LoRaWAN. Було розроблено розподілену мережу датчиків та шлюзів, що дозволять не лише визначати споживання а й розраховувати тиск в системі з метою виявлення виходу вузлів водопостачання за ладу.

Ефективний контроль тиску у водорозподільчій мережі необхідний для покращення її продуктивності. Ефективне застосування тиску може сприяти покращенню стійкості WDN. В магістрській роботі досліджено методи контролю тиску, які часто застосовуються в WDN.

Здійснено огляд сучасної літератури з питань контролю енергоресурсів, проведено аналіз методологічних засад щодо обліку споживання води. Проведено розробку тестового узла та шлюза з метою перевірки працездатності системи. Обрано хмарне середовище для зберігання даних з датчиків, проведено тестування системи. Розроблені на основі запропонованого методу шифратор та дешифратор надають можливість захистити від несанкціонованого доступу.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. A. Di Nardo, M. Di Natale, G.F. Santonastaso, V.G. Tzatchkov, V.H. Alcocer Yamanaka, Divide and conquer partitioning techniques for smart water networks, *Procedia Engineering*. 89 (2014) 1176-1183.
2. A. Di Nardo, M. Di Natale, A. Di Mauro, *Water Supply Network District Metering. Theory and Case Study*, Springer, 2013.
3. A. Di Nardo, M. Di Natale, D. Musmarra, G.F. Santonastaso, V.G. Tzatchkov, V.H. Alcocer-Yamanaka, Dual-use value of network partitioning for water system management and protection from malicious contamination, *Journal of Hydroinformatics* 17(3) (2015) pp. 361-376.
4. A. Di Nardo, M. Di Natale, G.F. Santonastaso, V. Tzatchkov, V. Alcocer-Yamanaka. Water Network Sectorization Based on Graph Theory and Energy Performance Indices, *J. Water Resour. Plann. Manage.* 140(5) (2013) pp. 620-629.
5. L.S. Perelman, M. Allen, A. Preis, M. Iqbal, A.J. Whittle, Automated sub-zoning of water distribution systems, *Environ. Model. Softw.* 65 (2015) 1-14.
6. A. Di Nardo, M. Di Natale, C. Giudicianni, D. Musmarra, G.F. Santonastaso, A. Simone. Water distribution system clustering and partitioning based on social network algorithms. *Procedia Engineering*. 119 (2015) pp. 196-205.
7. A. Di Nardo, M. Di Natale. A heuristic design support methodology based on graph theory for district metering of water supply networks. *Eng Optim.* 2(43) (2011) pp. 193-211.
8. R. Wright, I. Stoianov, P. Pappas, K. Henderson, J. King, Adaptive water distribution networks with dynamically reconfigurable topology, *Journal of Hydroinformatics*. 16(6) (2014) pp. 1280-1301.
9. L.S. Perelman, M. Allen, A. Preis, M. Iqbal, A.J. Whittle, Flexible Reconfiguration of Existing Urban Water Infrastructure Systems, *Environ. Sci. Technol.* 49(22) (2015) pp. 13378-13384.

10. A. Di Nardo, M. Di Natale, D. Musmarra, G.F. Santonastaso, F.P. Tuccinardi, G. Zaccone. Software for partitioning and protecting a water supply network. *Civil Engineering and Environmental Systems*. 33(1) (2016) pp. 1-15.

1. 11. Figueiredo, P. Esteves, and P. Cabrita, "Water wise - A digital water solution for smart cities and water management entities," *Procedia Comput. Sci.*, vol. 181, pp. 897-904, 2021, doi: 10.1016/J.PROCS.2021.01.245.

2. 12. J. Perez-Padillo, J. G. Morillo, J. Ramirez- Faz, M. T. Roldan, and P. Montesinos, "Design and implementation of a pressure monitoring system based on iot for water supply networks," *Sensors (Switzerland)*, vol. 20, no. 15, pp. 1-19, Aug. 2020, doi: 10.3390/S20154247.

13. M. R. Islam, S. Azam, B. Shanmugam, and D. Mathur, "A Review on Current Technologies and Future Direction of Water Leakage Detection in Water Distribution Network," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 107177-107201, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3212769.

14. N. K. Velayudhan, P. Pradeep, S. N. Rao, A. R. Devidas, and M. V. Ramesh, "IoT-Enabled Water Distribution Systems - A Comparative Technological Review," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 101042-101070, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3208142.

15. Manufacturing Plant', *Middle European Scientific Bulletin*, Volume 5. ISSN 2694-9970.

16. Yang, S., Chen, X., Chen, X., Yang, L., Chao, B., and Cao, J. (2015). 'A case study of Internet of Things: a wireless household water consumption monitoring system', *IEEE World Forum on Internet of Things*. IEEE Xplore. Yang, L., Yang, S., Magiera, E., Froelich, W., Jach, T., and Laspidou, C. (2017). 'Domestic water consumption monitoring and behaviour intervention by employing the internet of things technologies', *Proceedings of 8th IAIT, Macau*. *Procedia Computer Science*, 111(2017), pp. 367 - 375.

17. Ezzahar, J., Chehbouni, A., Hoedjes, J., Er-Raki, S., Chehbouni, Ah., Boulet, G., Bonnefond, J., and De Bruin, H. (2007). 'The use of the scintillation technique for monitoring seasonal water consumption of olive orchards in a semi-arid region', *agricultural water management*, 89(2007), pp. 173 - 184.

18. Tan, S., Wu, B., Yan, N., Zeng, H. (2018). ‘Satellite-Based Water Consumption Dynamics Monitoring in an Extremely Arid Area’, remote sensing, MDPI, doi:10.3390/rs10091399.

19. Guttag, J. (2017). Introduction to Computation and Programming Using Python. 2nd edn. USA: MIT.

20. Chen, Y., Lin, Y., Kung, C., Chung, M., and Yen, I. (2019). ‘Design and Implementation of Cloud Analytics Assisted Smart Power Meters Considering Advanced Artificial Intelligence as Edge Analytics in Demand-Side Management for Smart Homes’, Sensors, MDPI, doi:10.3390/s19092047.

ДОДАТОК А – ПРЕЗЕНТАЦІЯ