

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЧЕРКАСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ФАХОВИЙ БІЗНЕС-КОЛЕДЖ
КАФЕДРА КОМП'ЮТЕРНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
(повна назва випускної кафедри)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА БАКАЛАВРА

на тему:

**БЕЗДРОТОВА СЕНСОРНА МЕРЕЖА ДЛЯ МОНІТОРИНГУ
НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА**

Виконав:

студент групи 2КІ-23 зі спеціальності

123 – «Комп'ютерна інженерія»

Олександр ВОДОП'ЯНОВ

Науковий керівник:

к.т.н Роксолана БРЕУС

Черкаси 2025

АНОТАЦІЯ

У кваліфікаційній роботі запропоновано та розроблено концепцію бездротової сенсорної мережі для моніторингу навколишнього середовища, спрямовану на підвищення ефективності збору та аналізу екологічних даних.

Для побудови системи в даній роботі проаналізовано ключові потреби користувачів та обґрунтовано вибір технологічних рішень, включаючи сучасні сенсори, стандарти бездротового зв'язку та програмні платформи. Виконано комплексний аналіз існуючих аналогів систем моніторингу, що дозволило визначити їх функціональні особливості та врахувати їх при проектуванні власного рішення.

В роботі запропоновано архітектурну модель програмного та апаратного забезпечення, розроблено сценарії взаємодії користувачів із системою, а також спроектовано зручний інтерфейс для візуалізації даних. Реалізовано прототип системи, що включає розробку програмного забезпечення для сенсорних вузлів, шлюзу та клієнтської частини, а також впроваджено засоби захисту даних.

Пристрій/система призначена для збору, передачі та візуалізації даних про стан навколишнього середовища (температура, вологість, якість повітря тощо) з високою надійністю та енергоефективністю.

Кваліфікаційна робота бакалавра містить 75 аркуші пояснювальної записки та 3 рисунки.

Ключові слова: БЕЗДРОВОТА СЕНСОРНА МЕРЕЖА, МОНІТОРИНГ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА, ІОТ, СЕНСОРИ, ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ, АРХІТЕКТУРА СИСТЕМИ, ВІЗУАЛІЗАЦІЯ ДАНИХ.

ABSTRACT

In this bachelor's thesis, the concept of a wireless sensor network for environmental monitoring aimed at improving the efficiency of environmental data collection and analysis is proposed and developed.

To build the system, this paper analyzes the key needs of users and justifies the choice of technological solutions, including modern sensors, wireless communication standards, and software platforms. A comprehensive analysis of existing analogs of monitoring systems was performed, which allowed us to identify their functional features and take them into account when designing our own solution.

The paper proposes an architectural model of software and hardware, develops scenarios for user interaction with the system, and designs a user-friendly interface for data visualization. A prototype of the system was implemented, including the development of software for sensor nodes, gateway, and client side, and data protection tools were implemented.

The device/system is designed to collect, transmit and visualize environmental data (temperature, humidity, air quality, etc.) with high reliability and energy efficiency.

The bachelor's thesis contains 75 pages of explanatory notes and 3 figures.

Keywords: WIRELESS SENSOR NETWORK, ENVIRONMENTAL MONITORING, IOT, SENSORS, ENERGY EFFICIENCY, SYSTEM ARCHITECTURE, DATA VISUALIZATION.

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

BCM	–	Бездротова сенсорна мережа
LPWAN	–	Low Power Wide Area Network
WI-FI	–	Wireless Fidelity
LORAWAN	–	Long Range Wide Area Network
NB-IOT	–	Narrowband Internet of Things
TCP/IP	–	Transmission Control Protocol/Internet Protocol
MQTT	–	Message Queuing Telemetry Transport
COAP	–	Constrained Application Protocol
NDIR	–	Non-Dispersive Infrared
ГДК	–	Гранично допустимі концентрації
MEMS	–	Micro-Electro-Mechanical Systems
АЦП	–	Аналого-цифровий перетворювач
ОВП	–	Окислювально-відновний потенціал
ISE	–	Іоноселективні електрод
IDS	–	Intrusion Detection Systems
GDPR	–	General Data Protection Regulation
CCPA	–	California Consumer Privacy Act

ЗМІСТ

ВСТУП	3
РОЗДІЛ 1 ТЕХНОЛОГІЇ БЕЗДРОТОВОЇ СЕНСОРНОЇ СИСТЕМИ	5
1.1 Розробка та принцип роботи сенсорів	5
1.2 Стандарти бездротового зв'язку	8
1.3 Програмне забезпечення для збирання та аналізу даних	11
1.4 Енергозберігаючі технології	17
РОЗДІЛ 2 ЗАСТОСУВАННЯ БЕЗДРОТОВОЇ СЕНСОРНОЇ СИСТЕМИ ДЛЯ МОНІТОРИНГУ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА	23
2.1 Моніторинг якості повітря	23
2.2 Моніторинг рівня шуму	28
2.3 Моніторинг забруднення води	31
2.4 Моніторинг кліматичних параметрів	36
РОЗДІЛ 3 ПЕРЕВАГИ ТА ОБМЕЖЕННЯ БЕЗДРОТОВОЇ СЕНСОРНОЇ СИСТЕМИ	41
3.1 Переваги використання бездротових сенсорів	41
3.2 Обмеження в роботі бездротових сенсорів	45
3.3 Безпека та конфіденційність даних	49
3.4 Перспективи розвитку технології	53
РОЗДІЛ 4 ПРИКЛАДИ БЕЗДРОТОВИХ СЕНСОРНИХ СИСТЕМ	59
4.1 Проста система моніторингу температури та вологості на базі ESP8266/ESP32 та WI-FI	59
4.2 Система моніторингу якості повітря та метеоумов на базі LORAWAN	60
4.3 Розподілена система моніторингу рівня води та якості води на базі ZIGBEE/XBEE	63
ВИСНОВОК	66
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	68

ВСТУП

Актуальність теми зумовлена необхідністю впровадження сучасних, надійних та масштабованих рішень для постійного контролю за екологічною ситуацією, що сприятиме прийняттю обґрунтованих рішень у сфері охорони довкілля та забезпеченню сталого розвитку.

Сучасні проблеми, пов'язані зі змінами клімату, зростанням рівня урбанізації та техногенного навантаження, вимагають впровадження ефективних інструментів контролю за станом навколишнього середовища. Традиційні засоби екологічного моніторингу часто є дорогими, громіздкими та не здатні забезпечити оперативне збирання даних у реальному часі. У зв'язку з цим дедалі більше уваги приділяється впровадженню бездротових сенсорних мереж (БСМ), які відкривають нові можливості для побудови гнучких, масштабованих та автономних систем спостереження за різними екологічними параметрами.

Метою даної роботи є дослідження принципів побудови, компонентів, технологій та практичного застосування бездротової сенсорної мережі для моніторингу навколишнього середовища.

Для досягнення поставленої мети у роботі необхідно вирішити наступні завдання:

- проаналізувати сучасні технології бездротових сенсорних мереж;
- розглянути принципи роботи сенсорів та стандарти бездротового зв'язку;
- дослідити програмне забезпечення для збору, передачі та аналізу екологічних даних;
- провести аналіз енергозберігаючих технологій, що застосовуються у БСМ;
- розглянути типові напрями застосування БСМ для моніторингу стану повітря, води, шуму та кліматичних змін;

- визначити переваги, обмеження та перспективи розвитку технології;
- практичне впровадження БСМ на базі популярних апаратних рішень.

Об'єктом дослідження є бездротова сенсорна система як технологічна платформа, що забезпечує збирання та передачу даних про стан навколишнього середовища.

Предметом дослідження виступають конкретні технології, що використовуються в таких системах, їх застосування для моніторингу різних екосистем, а також аналіз переваг та обмежень, пов'язаних із їх впровадженням.

У роботі використано комплекс теоретичних та практичних методів дослідження:

- порівняльний аналіз – для оцінки ефективності різних стандартів бездротового зв'язку (Wi-Fi, LoRaWAN, ZigBee тощо) та підходів до енергозбереження;
- методи моделювання – для побудови логічної структури сенсорної мережі та аналізу її роботи за різних умов;
- методи системного підходу – для комплексного розгляду взаємодії сенсорів, контролерів, каналів зв'язку та програмного забезпечення;
- емпіричний підхід – у розробці та тестуванні прикладних моделей моніторингових систем з використанням сучасних мікроконтролерів (ESP32, LoRa-модулів, XBee тощо);
- візуалізація даних – для обробки та представлення результатів збирання екологічної інформації.

РОЗДІЛ 1 ТЕХНОЛОГІЇ БЕЗДРОВОЇ СЕНСОРНОЇ СИСТЕМИ

1.1 Розробка та принцип роботи сенсорів

Розробка бездротових сенсорних систем для моніторингу навколишнього середовища є однією з найбільш актуальних областей науки і техніки, що швидко розвиваються. Ці системи в останні роки знаходять все ширше застосування в різних сферах, включаючи екологічний моніторинг, управління ресурсами, сільське господарство, охорону здоров'я та багато інших [1].

Бездротові сенсорні системи забезпечують можливість збирання та передачі даних про стан навколишнього середовища в реальному часі, що дозволяє швидко реагувати на зміни та приймати обґрунтовані рішення. У цьому контексті важливо розглянути технології, що лежать в основі бездротових сенсорних систем, а також принципи роботи сенсорів, які відіграють ключову роль у їхньому функціонуванні [2].

Сучасні бездротові сенсорні системи складаються з безлічі компонентів, включаючи сенсори, мікроконтролери, модулі бездротового зв'язку та системи обробки даних. Сенсори – це пристрої, які перетворюють фізичні, хімічні чи біологічні параметри довкілля на електричні сигнали. Наприклад, температурні сенсори вимірюють температуру повітря чи води, а сенсори якості повітря можуть визначати рівень забруднюючих речовин. Кожен тип сенсора має свої особливості, які визначають його застосування та ефективність у конкретних умовах.

Важливим аспектом розробки бездротової сенсорної системи є вибір типу детекторів. Залежно від завдань моніторингу, можуть використовуватись різні технології та принципи роботи. Наприклад, для вимірювання температури можуть застосовуватись термомпари, термістори або інфрачервоні сенсори. Термомпари працюють на принципі термоелектричного ефекту, що виникає при з'єднанні двох різних металів, створюючи електричний струм за

зміни температури. Термометри на основі термісторів використовують зміну опору напівпровідникового матеріалу в залежності від температури. Інфрачервоні сенсори вимірюють теплове випромінювання об'єктів, що дозволяє визначати їх температуру без безпосереднього контакту [3].

Іншим важливим типом сенсорів є сенсори якості повітря, які можуть визначити рівень забруднюючих речовин, таких як вуглекислий газ, оксиди азоту та інші. Ці сенсори зазвичай ґрунтуються на принципах хімічної реакції, де зміна концентрації забруднюючих речовин призводить до зміни електричного сигналу. Наприклад, газові сенсори на основі напівпровідникових матеріалів можуть змінювати свій опір залежно від концентрації певних газів у повітрі. Це дозволяє здійснювати моніторинг якості повітря в реальному часі, що особливо важливо в умовах міської забудови та промислового виробництва.

Сенсори вологості, які використовуються для моніторингу рівня вологості в повітрі чи ґрунті, також мають різноманітні технології. Наприклад, конденсаторні сенсори вимірюють вологість на основі зміни ємності, яка залежить від вмісту води у повітрі. Інші типи сенсорів, такі як резистивні, вимірюють зміну опору матеріалу, що відбувається за зміни вологості. Ці дані можуть бути використані для управління поливом у сільському господарстві або для моніторингу мікроклімату у приміщеннях [4].

Після того, як сенсори зібрали дані, вони передаються в центральну систему обробки. Для цього в бездротових сенсорних системах використовуються різні технології бездротового зв'язку, такі як Zigbee, LoRa, Bluetooth та Wi-Fi. Вибір технології передачі даних залежить від вимог до дальності зв'язку, енергоспоживання та пропускної спроможності. Наприклад, Zigbee та LoRa ідеально підходять для застосування в умовах обмеженої потужності та великої дальності, що робить їх ідеальними для використання у віддалених районах. Bluetooth з іншого боку забезпечує високу швидкість передачі даних на невеликих відстанях і часто використовується в пристроях з низьким енергоспоживанням [5].

Системи з урахуванням Wi-Fi забезпечують високу пропускну спроможність і можуть використовуватися передачі великих обсягів даних, але вимагають значніших ресурсів проти іншими технологіями. Важливо, що кожна з технологій має свої переваги та недоліки, і вибір конкретного рішення має ґрунтуватися на вимогах проекту та умовах експлуатації [6].

Енергоспоживання є однією з ключових проблем розробки бездротових сенсорних систем. Багато детекторів працюють від батарей, і їх термін служби безпосередньо залежить від ефективності роботи системи. Для збільшення часу роботи від батарей можуть використовуватись різні методи, такі як режими низького енергоспоживання, тимчасова синхронізація передачі даних та використання енергоефективних мікроконтролерів. Наприклад, деякі системи можуть переходити в сплячий режим, коли немає необхідності передачі даних, що дозволяє значно знизити споживання енергії.

Обробка даних, отриманих від сенсорів, є наступним важливим етапом у роботі бездротової сенсорної системи. Дані можуть оброблятися на пристрої (edge computing) або передаватися на хмарні платформи для подальшого аналізу. Хмарні технології дозволяють зберігати та обробляти великі обсяги даних, що відкриває можливості для застосування алгоритмів машинного навчання та штучного інтелекту. Це дозволяє не тільки здійснювати моніторинг у реальному часі, а й передбачати зміни у навколишньому середовищі на основі аналізу історичних даних.

Крім того, сучасні бездротові сенсорні системи можуть інтегруватися з іншими системами та пристроями, що дозволяє створювати комплексні рішення для моніторингу та керування. Наприклад, дані про якість повітря можуть бути пов'язані з системами керування вентиляцією та опаленням, що дозволяє оптимізувати умови у приміщеннях та знижувати рівень забруднення. У сільському господарстві сенсори можуть бути інтегровані із системами автоматичного поливу, що дозволяє ефективно керувати ресурсами та підвищувати врожайність [7].

Таким чином, бездротові сенсорні системи для моніторингу навколишнього середовища є складними та багатофункціональними пристроями, які вимагають глибокого розуміння як технології, так і особливостей роботи сенсорів. Розробка таких систем включає безліч етапів, починаючи від вибору сенсорів і технологій передачі даних до обробки та аналізу зібраної інформації. Ці системи мають величезний потенціал для покращення якості життя, підвищення ефективності управління ресурсами та захисту навколишнього середовища. Важливо продовжувати дослідження та розробки в цій галузі, щоб створювати більш ефективні та стійкі рішення для моніторингу навколишнього середовища.

1.2 Стандарти бездротового зв'язку

Вибір стандарту бездротового зв'язку є одним із ключових рішень при проектуванні такої системи, оскільки він визначає такі параметри, як дальність передачі даних, енергоспоживання, пропускна спроможність, вартість обладнання та складність інтеграції. Існує безліч стандартів бездротового зв'язку, кожен з яких має свої переваги та недоліки, роблячи одні більш придатними для певних додатків, ніж інші.

Одним із найпоширеніших і добре відомих стандартів є Wi-Fi (IEEE 802.11). Wi-Fi забезпечує високу пропускну здатність та відносно великий радіус дії, особливо в останніх версіях стандарту (наприклад, 802.11n, 802.11ac, 802.11ax). Це робить його привабливим для додатків, де потрібно передавати великі обсяги даних, наприклад потокове відео або докладні дані з високочастотних датчиків. Однак, Wi-Fi зазвичай характеризується більш високим енергоспоживанням в порівнянні з іншими стандартами, що може бути критично для сенсорних вузлів, що працюють від батарей. Крім того, для роботи Wi-Fi потрібна наявність точки доступу (роутера), що може обмежувати його застосування у віддалених чи інфраструктурно слабо розвинених районах [8].

Іншим популярним стандартом є Bluetooth (IEEE 802.15.1). Класичний Bluetooth забезпечує середню пропускну здатність та радіус дії, а також помірно енергоспоживання. Більш нова версія, Bluetooth Low Energy (BLE або Bluetooth Smart), розроблена спеціально для додатків з низьким енергоспоживанням, таких як пристрої, що носяться, і різні датчики. BLE забезпечує значно менше енергоспоживання порівняно з класичним Bluetooth та Wi-Fi, що робить його дуже привабливим для бездротових сенсорних мереж, де вузли мають працювати автономно протягом тривалого часу. Однак BLE зазвичай має меншу пропускну здатність та радіус дії в порівнянні з Wi-Fi [9].

Для додатків, що вимагають передачі невеликих обсягів даних на великі відстані при низькому споживанні енергії, часто використовуються технології Low Power Wide Area Network (LPWAN). До таких технологій відносяться LoRaWAN та NB-IoT (Narrowband Internet of Things).

LoRaWAN – це відкритий протокол, розроблений для створення далеких зв'язків за низького енергоспоживання. Він використовує радіочастотні діапазони, що не ліцензуються, і дозволяє сенсорним вузлам передавати невеликі пакети даних на відстані до декількох кілометрів у міському середовищі і до 15 кілометрів у сільській місцевості. LoRaWAN характеризується низьким енергоспоживанням, що забезпечує тривалий час роботи від батарей, але має відносно низьку пропускну здатність і може бути схильний до інтерференції в діапазонах, що не ліцензуються. Архітектура LoRaWAN зазвичай включає кінцеві пристрої (сенсорні вузли), шлюзи (базові станції) і мережевий сервер, який управляє мережею і обробляє дані [10].

NB-IoT - це стандарт, розроблений консорціумом 3GPP і працює в радіочастотних діапазонах, що ліцензуються, часто в смугах стільникового зв'язку. NB-IoT забезпечує гарне покриття та надійність зв'язку, а також низьке енергоспоживання. Він оптимізований для передачі невеликих обсягів даних та може підтримувати велику кількість пристроїв на одній базовій станції. Однак, розгортання мережі NB-IoT вимагає наявності відповідної

інфраструктури стільникового зв'язку і може бути пов'язане з операторськими витратами.

Ще одним стандартом, що часто використовується в бездротових сенсорних мережах, є Zigbee (IEEE 802.15.4). Zigbee - це протокол з низьким енергоспоживанням, що працює в радіочастотних діапазонах, що не ліцензуються і орієнтований на створення локальних мереж з пористою топологією (mesh network). Комірчаста топологія дозволяє вузлам мережі ретранслювати дані один одного, збільшуючи тим самим загальне покриття та надійність мережі. Zigbee забезпечує помірну пропускну здатність та радіус дії, а його низьке енергоспоживання робить його придатним для живлення від батарей. Zigbee часто використовується в системах розумного будинку, промислової автоматизації та збору даних із датчиків [11].

Крім перерахованих, існують інші стандарти бездротового зв'язку, які можна розглянути залежно від специфічних вимог докладання. Наприклад, Sigfox є ще однією технологією LPWAN, яка орієнтована на передачу невеликих повідомлень на великі відстані при дуже низькому споживанні енергії. Z-Wave – це пропрієтарний протокол, який також часто використовується в системах розумного будинку і характеризується низьким енергоспоживанням та надійним зв'язком у локальних мережах.

При виборі стандарту бездротового зв'язку для бездротової сенсорної системи моніторингу навколишнього середовища необхідно ретельно проаналізувати вимоги щодо дальності передачі, енергоспоживання, пропускну спроможності, вартості обладнання, доступності інфраструктури та надійності зв'язку. Залежно від конкретної програми оптимальним може бути використання одного стандарту або комбінації декількох стандартів для різних частин системи. Наприклад, для збирання даних з віддалених датчиків може бути використаний LoRaWAN або NB-IoT, а для передачі агрегованих даних на центральний сервер - Wi-Fi або стільникові технології [12].

Таким чином, стандарти бездротового зв'язку є широким спектром технологій, кожна з яких має унікальний набір характеристик, що роблять їх

застосовними для різних сценаріїв використання в бездротових сенсорних системах моніторингу навколишнього середовища. Ретельний аналіз вимог додатка та порівняння характеристик різних стандартів є ключовими кроками для вибору відповідного рішення.

1.3 Програмне забезпечення для збирання та аналізу даних

Архітектура програмного забезпечення може бути багаторівневою і включати компоненти, що працюють як на рівні окремих сенсорних вузлів і шлюзів, так і на центральному сервері або в хмарному середовищі. На рівні сенсорних вузлів програмне забезпечення, як правило, являє собою вбудоване програмне забезпечення (firmware), яке відповідає за керування роботою сенсора, збирання первинних даних, їхню попередню обробку (наприклад, фільтрацію, калібрування), а також організацію передачі даних за вибраним протоколом бездротового зв'язку.

Це програмне забезпечення має бути енергоефективним, займати невеликий обсяг пам'яті та забезпечувати надійну роботу в умовах обмежених ресурсів мікроконтролера. Мови програмування, що використовуються для розробки вбудованого програмного забезпечення, часто включають C, C++ або спеціалізовані мови для мікроконтролерів [13].

На рівні шлюзів (якщо вони присутні в архітектурі системи, наприклад, LoRaWAN або Zigbee) програмне забезпечення відповідає за агрегацію даних, отриманих від безлічі сенсорних вузлів по одному протоколу, і їх подальшу передачу на центральний сервер або в хмару по іншому протоколу (наприклад, Ethernet, Wi-Fi). Шлюзове програмне забезпечення також може виконувати деякі функції попередньої обробки даних або маршрутизації. Операційні системи реального часу (RTOS) часто використовуються на шлюзах для забезпечення надійної та передбачуваної роботи в умовах обробки даних від великої кількості джерел.

Основна частина програмного забезпечення для збору та аналізу даних зазвичай розгортається на центральному сервері або у хмарній інфраструктурі. Це програмне забезпечення виконує низку ключових функцій.

Збір даних. Центральне програмне забезпечення має забезпечувати прийом даних, що надходять від сенсорних вузлів або шлюзів за різними протоколами зв'язку. Це може містити підтримку різних мережевих протоколів (наприклад, TCP/IP, MQTT, CoAP) та форматів даних (наприклад, JSON, XML, бінарні формати). Важливим аспектом є масштабування системи збору даних для обробки потоків інформації від великої кількості розподілених сенсорних вузлів [14].

Зберігання даних. Зібрані дані необхідно надійно зберігати для подальшого аналізу та візуалізації. Для цього можна використовувати різні типи баз даних, такі як реляційні (наприклад, PostgreSQL, MySQL) або NoSQL (наприклад, MongoDB, Cassandra, InfluxDB). Вибір бази даних залежить від обсягу та структури даних, вимог до швидкості запису та читання, а також необхідності виконання складних запитів та аналітичних операцій. Для тимчасових рядів даних, характерних для моніторингу навколишнього середовища, часто використовуються спеціалізовані бази даних тимчасових рядів (time-series databases), які оптимізовані для зберігання та обробки даних з тимчасовими мітками.

Обробка та аналіз даних. Після збору та зберігання дані піддаються обробці та аналізу. Це може включати в себе:

Валідація даних. Перевірка даних на коректність та відповідність очікуваним діапазнам значень, виявлення пропущених чи помилкових вимірів.

Калібрування та корекція. Застосування калібрувальних коефіцієнтів та моделей для перетворення «сирих» даних у фізичні величини та компенсації впливу зовнішніх факторів.

Агрегація та усереднення. Об'єднання даних за певні часові інтервали або від кількох сенсорів для отримання інформації.

Статистичний аналіз. Розрахунок статистичних характеристик (середнє, медіана, стандартне відхилення та ін.), Виявлення кореляцій та залежностей між різними параметрами [15].

Виявлення аномалій. Ідентифікація незвичайних або викидних значень, які можуть свідчити про несправність обладнання або виникнення нештатних ситуацій у навколишньому середовищі.

Прогнозування – використання методів часових рядів та машинного навчання для прогнозування майбутніх значень контрольованих параметрів на основі історичних даних.

Геопросторовий аналіз – обробка даних, що мають географічну прив'язку, для створення карток розподілу параметрів, виявлення просторових закономірностей та проведення аналізу в контексті місцевості.

Машинне навчання та штучний інтелект – застосування алгоритмів машинного навчання для автоматичного виявлення прихованих закономірностей, класифікації станів довкілля, прогнозування подій та оптимізації роботи системи.

Для реалізації цих функцій можуть використовуватися різні програмні інструменти та бібліотеки, написані мовами програмування, як Python (з бібліотеками NumPy, SciPy, Pandas, scikit-learn, TensorFlow, PyTorch), R, Java та ін [16].

Візуалізація даних – подання оброблених та проаналізованих даних у наочній формі є важливим аспектом програмного забезпечення. Інструменти візуалізації дозволяють користувачам легко інтерпретувати інформацію, виявляти тренди та аномалії. Це може включати створення графіків часових рядів, діаграм розсіювання, гістограм, теплових карт, географічних карт з колірною індикацією параметрів і інтерактивних дашбордів. Для розробки інтерфейсів візуалізації можуть використовуватись різні бібліотеки та фреймворки, такі як Matplotlib, Seaborn, Plotly, Leaflet, а також спеціалізовані Ві-платформи (наприклад, Tableau, Grafana).

Управління системою – крім збору та аналізу даних, програмне забезпечення може також забезпечувати функції керування бездротовою сенсорною мережею. Це може включати в себе:

- моніторинг стану сенсорних вузлів. Відстеження їх активності, рівня заряду батареї, якості зв'язку.
- дистанційне налаштування та оновлення програмного забезпечення. Можливість віддаленої конфігурації параметрів роботи сенсорних вузлів та оновлення їх прошивки.
- керування доступом та безпекою. Забезпечення авторизації користувачів та захисту даних від несанкціонованого доступу [17].
- керування оповіщеннями. Налаштування правил генерації та доставки повідомлень про критичні події або перевищення граничних значень.

Таким чином, програмне забезпечення для збору та аналізу даних у бездротовій сенсорній системі моніторингу навколишнього середовища є складним і багатофункціональним комплексом, що охоплює рівні від вбудованого ПЗ на кінцевих пристроях до централізованих серверних або хмарних додатків. Ефективна розробка та інтеграція всіх компонентів програмного забезпечення є запорукою успішної роботи всієї системи та отримання цінної інформації про стан навколишнього середовища.

Розглянемо детальніше архітектурні підходи щодо побудови такого програмного забезпечення. Існує кілька поширених архітектур, включаючи централізовану, розподілену та гібридну [18].

У централізованій архітектурі всі дані від сенсорних вузлів надходять на єдиний центральний сервер, де здійснюється їх зберігання, обробка та аналіз. Така архітектура спрощує управління та аналіз даних, але може стати вузьким місцем при великій кількості сенсорних вузлів та великих обсягах даних, а також потребує надійного мережного з'єднання між усіма вузлами та сервером.

Розподілена архітектура передбачає часткову обробку даних безпосередньо на сенсорних вузлах чи локальних шлюзах. Наприклад, прості

операції фільтрації чи агрегації можуть виконуватися лише на рівні вузлів, і лише оброблені дані передаються центральний сервер. Це дозволяє знизити навантаження на мережу та центральний сервер, а також підвищити стійкість до відмови системи, оскільки локальні збої не обов'язково призводять до втрати всіх даних. Однак розподілена архітектура може бути складнішою у розробці та управлінні.

Гібридна архітектура поєднує в собі елементи централізованої та розподіленої моделей, намагаючись використати переваги обох. Наприклад, попередня обробка може виконуватися локально, а складні аналітичні операції та довгострокове зберігання даних – на центральному сервері або у хмарі.

Далі, заглибимося у технології обміну даними між різними компонентами системи. На рівні сенсорних вузлів можуть використовуватися легковагові протоколи, такі як MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) або CoAP (Constrained Application Protocol), розроблені спеціально для пристроїв з обмеженими ресурсами та нестабільним мережевим підключенням. MQTT - це брокер-орієнтований протокол, де пристрої публікують дані на певні теми, а зацікавлені передплатники одержують ці дані. CoAP - це протокол, заснований на RESTful-архітектурі та використовує UDP, що знижує накладні витрати [19].

Для передачі даних від шлюзів на центральний сервер можуть використовуватися більш традиційні протоколи, такі як HTTP/HTTPS або більш продуктивні та масштабовані протоколи, такі як gRPC. Вибір протоколу залежить від вимог до швидкості передачі, надійності та безпеки.

Розглянемо докладніше технології зберігання даних. Крім реляційних та NoSQL баз даних, для зберігання часових рядів даних, що генеруються сенсорними системами, все частіше використовуються спеціалізовані часові бази даних (Time Series Databases - TSDB), такі як InfluxDB, TimescaleDB або Prometheus. Ці бази даних оптимізовані для запису та запитів даних із тимчасовими мітками, забезпечують ефективне стиснення, високу швидкість

запису та спеціальні функції для аналізу часових рядів (наприклад, агрегація за часом, ковзаючі вікна) [20].

В області обробки та аналізу даних можна виділити декілька ключових напрямків. Поточкова обробка даних стає все більш важливою для систем, що генерують безперервні потоки даних в реальному часі. Такі фреймворки, як Apache Kafka Streams, Apache Flink або Spark Streaming, дозволяють обробляти дані в міру їх надходження, виконувати аналітику в реальному часі та оперативно реагувати на зміни в навколишньому середовищі.

Для більш складного аналізу та машинного навчання використовуються такі платформи та бібліотеки, як TensorFlow, PyTorch, scikit-learn, а також хмарні послуги машинного навчання (наприклад, Amazon SageMaker, Google AI Platform, Azure Machine Learning). Ці інструменти дозволяють будувати та навчати моделі для прогнозування, класифікації, виявлення аномалій та інших завдань аналізу даних.

У контексті візуалізації даних сучасні BI-платформи, такі як Tableau, Power BI або Grafana, надають широкі можливості для створення інтерактивних дашбордів та звітів, дозволяючи користувачам досліджувати дані, виявляти закономірності та приймати обґрунтовані рішення. Також існують спеціалізовані бібліотеки візуалізації на Python (наприклад, Bokeh, Altair), які можуть бути інтегровані до веб-додатків [21].

Нарешті, управління системою включає у собі як моніторинг стану вузлів, а також оркестрацію і управління конфігурацією великої кількості розподілених пристроїв. Для цього можна використовувати такі інструменти, як Ansible, Chef або Kubernetes (особливо в хмарних розгортаннях). Також важливим аспектом є безпека програмного забезпечення, включаючи захист даних при передачі та зберіганні, автентифікацію та авторизацію користувачів та пристроїв, а також регулярне оновлення програмного забезпечення для усунення вразливостей [22].

Таким чином, програмне забезпечення для збору та аналізу даних у бездротових сенсорних системах моніторингу навколишнього середовища є

складним і багатогранним набором технологій і підходів, що охоплює різні рівні архітектури, протоколи обміну даними, технології зберігання та обробки, інструменти візуалізації та системи управління. Глибоке розуміння цих аспектів необхідне розробки ефективних і надійних систем моніторингу.

1.4 Енергозберігаючі технології

Енергоефективність безпосередньо впливає на термін служби батарей, вартість експлуатації та екологічну стійкість усієї системи. Існує безліч технологій та підходів, спрямованих на мінімізацію енергоспоживання на різних рівнях бездротової сенсорної мережі, починаючи від апаратного забезпечення сенсорних вузлів та закінчуючи програмним забезпеченням та протоколами зв'язку .

На рівні апаратного забезпечення ключову роль відіграють вибір компонентів з низьким енергоспоживанням та застосування технік керування живленням. Мікроконтролери, радіомодулі та самі сенсори можуть мати різні режими роботи з різним рівнем споживання енергії.

Мікроконтролери часто підтримують глибокі режими сну (deep sleep modes), у яких споживання струму може знижуватися до мікроампер або навіть наноампер. Радіомодулі також можуть мати режими очікування з низьким енергоспоживанням, активуючись лише на короткий час передачі або прийому даних. При виборі сенсорів слід віддавати перевагу тим моделям, які забезпечують необхідну точність та чутливість при мінімальному споживанні енергії.

Управління живленням на рівні сенсорного вузла включає різні стратегії для мінімізації загального енергоспоживання. Однією з основних технік є циклічний режим роботи (duty cycling), у якому сенсорний вузол більшу частину часу перебуває у сплячому режимі і періодично прокидається виконання вимірювань і передачі. Тривалість активного періоду та інтервал між активними періодами можуть динамічно регулюватися в залежності від

частоти змін контрольованого параметра та вимог до оперативності отримання даних. Інший підхід полягає у використанні керованих перериваннями (interrupt-driven) подій, коли сенсорний вузол прокидається тільки при виникненні певної події (наприклад, перевищення порогового значення) замість того, щоб періодично опитувати сенсори [23].

Енергозберігаючі протоколи бездротового зв'язку відіграють значну роль в оптимізації енергоспоживання системи. Як уже було обговорено раніше, такі стандарти, як Bluetooth Low Energy (BLE), LoRaWAN, NB-IoT і Zigbee, спочатку розроблялися з урахуванням низького енергоспоживання. BLE, наприклад, характеризується короткими сеансами зв'язку та тривалими періодами сну. LoRaWAN та NB-IoT оптимізовані для передачі невеликих обсягів даних на великі відстані за мінімального енергоспоживання.

Zigbee підтримує пористу топологію, яка може підвищити загальну енергоефективність мережі за рахунок багатокрокової передачі даних та можливості сплячого режиму для проміжних вузлів. Вибір відповідного протоколу зв'язку, а також оптимізація параметрів його роботи може суттєво вплинути на енергоспоживання всієї системи.

На рівні програмного забезпечення також можуть застосовуватись різні алгоритми та техніки для зниження енергоспоживання. Наприклад, алгоритми стиснення даних можуть зменшити обсяг інформації, що передається, тим самим скорочуючи час роботи радіомодуля. Агрегація даних на рівні сенсорних вузлів або шлюзів дозволяє об'єднувати кілька вимірів в один пакет, знижуючи кількість передач.

Адаптивні алгоритми вибірки можуть динамічно регулювати частоту вимірювань залежно від швидкості зміни контрольованого параметра, виконуючи більш часті вимірювання лише за необхідності. Прогнозуючі моделі можуть використовуватися для прогнозування майбутніх значень параметрів, що дозволяє знизити частоту реальних вимірювань.

Ще одним важливим аспектом енергозбереження є використання альтернативних джерел енергії. У тих випадках, коли заміна батарей

утруднена або небажана, можуть застосовуватись сонячні панелі, вітрогенератори, термоелектричні генератори або системи збирання енергії вібрації (energy harvesting) для живлення сенсорних вузлів. Розмір та ефективність цих джерел енергії мають бути ретельно розраховані з урахуванням енергоспоживання вузла та умов навколишнього середовища. Використання суперконденсаторів або акумуляторів з низьким саморозрядом у поєднанні із системами збирання енергії може забезпечити стабільне та довгострокове живлення [24].

На рівні мережевої організації та топології також є можливості для енергозбереження. Топологія мережі (наприклад, зірка, дерево, пориста) може впливати на енергоспоживання під час передачі даних. В мережах, наприклад, деякі вузли можуть виступати в якості ретрансляторів, споживаючи додаткову енергію, але при цьому забезпечуючи зв'язок для віддалених вузлів, які можуть перебувати в сплячому режимі більшу частину часу. Алгоритми маршрутизації можуть бути розроблені з урахуванням мінімізації енергоспоживання при передачі даних, наприклад шляхом вибору маршрутів з найменшою кількістю проміжних вузлів або вузлів з достатнім рівнем заряду батареї

Нарешті, моніторинг та управління енергоспоживанням усієї системи є важливими аспектами. Центральне програмне забезпечення може відстежувати рівень заряду батареї окремих вузлів, аналізувати їхнє енергоспоживання та надавати рекомендації щодо оптимізації параметрів роботи для збільшення терміну служби батарей. Також може бути реалізована можливість віддаленого керування режимами роботи сенсорних вузлів (наприклад, зміна частоти вимірювань, перехід у режим сну) залежно від поточних потреб та стану мережі.

Таким чином, енергозберігаючі технології у бездротових сенсорних системах моніторингу навколишнього середовища охоплюють широкий спектр підходів на рівні апаратного забезпечення, протоколів зв'язку, програмного забезпечення, джерел живлення та мережевої організації.

Комплексне застосування цих технологій дозволяє створювати довговічні, економічні та екологічно стійкі системи моніторингу [25].

Для більшого розуміння розділу можна глибше розглянути конкретні методи та протоколи, а також навести приклади їх реалізації та ефективності.

Почнемо з циклічного режиму роботи (Duty Cycling). Існують різні стратегії визначення оптимального часу активності та сну. Фіксований Duty Cycle передбачає постійне співвідношення часу активності та періоду сну для всіх вузлів або групи вузлів. Це просто в реалізації, але може бути неефективним, оскільки не враховує зміни в навколишньому середовищі або потреби в даних. Адаптивний Duty Cycle динамічно регулює час активності залежно від подій чи змін контрольованих параметрів. Якщо датчик виявляє різку зміну температури, може збільшити частоту передачі. Існують також алгоритми планування (scheduling algorithms), які координують час активності сусідніх вузлів, щоб уникнути колізій під час передачі даних та оптимізувати енергоспоживання всієї мережі. Прикладом такого протоколу є S-MAC (Sensor-MAC), розроблений спеціально для бездротових сенсорних мереж.

У контексті енергозберігаючих протоколів бездротового зв'язку варто детальніше розглянути механізми, які використовуються для мінімізації енергоспоживання. У BLE, наприклад, основними енергозберігаючими механізмами є короткі з'єднання, використання режимів сну з низьким енергоспоживанням між з'єднаннями та оптимізовані процедури виявлення пристроїв. LoRaWAN використовує модуляцію LoRa, яка забезпечує велику дальність зв'язку при низькому енергоспоживання, а також протокол ALOHA для доступу до середовища, де кожен вузол передає дані, коли вони готові, що може бути енергоефективним для нечастих передач. Zigbee підтримує різні топології, включаючи комірчасту, де дані можуть передаватися через кілька вузлів, дозволяючи віддаленим вузлам залишатися в сплячому режимі більшу частину часу. Протокол також визначає різні режими сну для маршрутизаторів та кінцевих пристроїв [26].

Розглядаючи алгоритми стиснення даних, можна згадати різні методи, починаючи від простих алгоритмів без втрат (наприклад, Хаффмана, LZW) до більш складних алгоритмів із втратами (наприклад, вейвлет-перетворення), які можуть суттєво зменшити обсяг даних, особливо для мультимедійних сенсорів (наприклад, камер). Вибір алгоритму залежить від типу даних та допустимого рівня втрати інформації.

В області агрегації даних різні методи можуть використовуватися для об'єднання показань від декількох сенсорів або декількох послідовних вимірювань одного сенсора. Прості методи включають усереднення або вибір максимального/мінімального значення. Більш складні методи можуть використовувати просторово-часові кореляції між даними формування більш компактних уявлень.

Адаптивні алгоритми вибірки можуть ґрунтуватися на різних критеріях, таких як швидкість зміни даних, відхилення від середнього значення або прогноз майбутніх значень. Наприклад, якщо значення температури залишається практично незмінним протягом тривалого часу, частота вимірювань може бути знижена.

При використанні альтернативних джерел енергії ефективність системи збирання енергії безпосередньо залежить від умов навколишнього середовища (наприклад, інтенсивності сонячного випромінювання, швидкості вітру, рівня вібрації). Необхідно проводити ретельний аналіз цих факторів на етапі проектування системи для визначення оптимального розміру та типу джерела енергії. Управління зарядженням та розрядженням накопичувачів енергії (наприклад, акумуляторів, суперконденсаторів) також є важливим аспектом для забезпечення надійної роботи системи.

На рівні мережевої організації протоколи маршрутизації з урахуванням енергоспоживання (energy-aware routing protocols) можуть вибирати шляхи передачі даних, що мінімізують загальне енергоспоживання мережі або продовжують термін служби батарей найбільш критичних вузлів. Прикладами

таких протоколів є LEACH (Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy) та PEGASIS (Power-Efficient GATHERing in Sensor Information Systems) [27].

Нарешті, моніторинг та управління енергоспоживанням можуть включати розробку спеціалізованих програмних інструментів, які збирають інформацію про споживання енергії окремими вузлами, візуалізують ці дані та надають адміністраторам системи кошти для віддаленого налаштування параметрів енергозбереження. Також можуть використовуватись алгоритми машинного навчання для автоматичного визначення оптимальних режимів роботи вузлів залежно від поточних умов та потреб системи.

Таким чином, існує безліч сучасних технологій і методів, спрямованих на оптимізацію енергоспоживання в бездротових сенсорних системах моніторингу навколишнього середовища. Їхнє ефективне застосування вимагає глибокого розуміння характеристик апаратного забезпечення, протоколів зв'язку, алгоритмів обробки даних та особливостей конкретного додатку.

РОЗДІЛ 2 ЗАСТОСУВАННЯ БЕЗДРОВОЇ СЕНСОРНОЇ СИСТЕМИ ДЛЯ МОНІТОРИНГУ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

2.1 Моніторинг якості повітря

Бездротові сенсорні мережі надають гнучку, масштабовану та економічно ефективну альтернативу традиційним стаціонарним станціям моніторингу якості повітря, дозволяючи отримувати більш детальні та просторово-часові дані про поширення забруднюючих речовин.

Моніторинг якості повітря за допомогою бездротових сенсорних мереж включає в себе виявлення та вимірювання концентрації різних забруднюючих речовин, таких як тверді частинки (PM_{2.5}, PM₁₀), оксиди азоту (NO_x), оксиди сірки (SO_x), оксид вуглецю (CO), леткі органічні сполуки (VOCs) джерела забруднення та цілей моніторингу. Для виявлення цих речовин використовуються різні типи сенсорів, кожен з яких ґрунтується на певних фізичних чи хімічних принципах.

Датчики твердих частинок (PM) зазвичай працюють за оптичним принципом, вимірюючи розсіювання світла на частинках повітря. Лазерний промінь прямує через повітряний потік, і фотодетектор вимірює інтенсивність розсіяного світла, яка корелює з концентрацією та розміром частинок. Розрізняють датчики, здатні вимірювати PM_{2.5} (частки з аеродинамічним діаметром менше 2.5 мікрометрів) та PM₁₀ (менше 10 мікрометрів), які становлять найбільшу небезпеку для здоров'я людини, проникаючи глибоко у легені. Більш просунуті датчики можуть надавати інформацію про розподіл частинок за розмірами [28].

Електрохімічні сенсори широко використовуються для виявлення газоподібних забруднювачів, таких як CO, NO_x (включаючи NO та NO₂), SO_x (включаючи SO₂) та O₃. Ці сенсори містять електроліт та електроди, на яких відбуваються хімічні реакції з цільовим газом, генеруючи електричний струм, пропорційний концентрації газу. Селективність цих сенсорів до певного газу

досягається за рахунок використання специфічних матеріалів електродів та електролітів. Однак електрохімічні сенсори можуть бути чутливі до вологості та температури, що потребує калібрування та компенсації впливу цих факторів.

Металооксидні напівпровідникові (MOS) сенсори засновані на зміні електричного опору напівпровідникового матеріалу (зазвичай оксиду металу, такого як SnO_2 , WO_3) при адсорбції на поверхні молекул цільового газу (наприклад, VOCs, CO, NH_3). Ці сенсори зазвичай мають низьку вартість і можуть виявляти широкий спектр газів, але можуть мати меншу селективність і стабільність у порівнянні з електрохімічними сенсорами. Для підвищення селективності можуть використовуватися масиви MOS-сенсорів із різними чутливими матеріалами та алгоритми розпізнавання образів.

Недисперсійні інфрачервоні (NDIR) сенсори використовуються в основному для вимірювання концентрації CO_2 та деяких інших газів, що поглинають інфрачервоне випромінювання на певних довжинах хвиль (наприклад, CH_4). ІЧ-джерело випромінює світло через вимірювальну камеру, і детектор вимірює інтенсивність світла, що пройшло, на характерній довжині хвилі поглинання цільового газу. Ступінь поглинання світла пропорційна концентрації газу (закон Бугера-Ламберта-Бера). NDIR-сенсори мають хорошу стабільність і селективність для CO_2 [29].

Фотоіонізаційні детектори (PID) використовуються для виявлення широкого спектру VOCs. Вони працюють, іонізуючи молекули газу під впливом ультрафіолетового випромінювання. Іони, що утворилися, збираються електродами, створюючи електричний струм, пропорційний концентрації VOCs. PID мають високу чутливість до багатьох органічних сполук, але можуть бути менш селективними.

При розгортанні бездротової сенсорної мережі для моніторингу якості повітря необхідно враховувати низку факторів, включаючи вибір відповідних сенсорів залежно від контрольованих забруднювачів та вимог до точності, розміщення сенсорних вузлів для забезпечення репрезентативного охоплення

території, енергоефективність системи для тривалої автономної роботи, а також калібрування та обслуговування сенсорів підтрим.

Розміщення сенсорних вузлів є важливим для отримання інформативних даних про якість повітря. Вузли можуть розміщуватись поблизу потенційних джерел забруднення (наприклад, промислових підприємств, автострад), у житлових районах для оцінки впливу на населення, у фонових точках для визначення регіонального рівня забруднення, а також поблизу чутливих екосистем. Щільність розміщення вузлів може змінюватись в залежності від цілей моніторингу та просторової мінливості забруднення.

Калібрування сенсорів якості повітря є складним завданням, оскільки характеристики сенсорів можуть змінюватись з часом та під впливом умов довкілля. Рекомендується проводити періодичне калібрування з використанням еталонних газових сумішей та аерозолів. Для деяких типів сенсорів можуть застосовуватись методи самокалібрування або калібрування за опорними даними стаціонарних станцій моніторингу [30].

Обробка та аналіз даних від мережі сенсорів якості повітря включає фільтрацію шумів, корекцію впливу температури і вологості, агрегацію даних, просторово-часову інтерполяцію для створення карт забруднення, а також застосування статистичних методів і моделей машинного навчання для виявлення джерел забруднення, прогнозування рівнів забруднення та оцінки впливу на здоров'я населення.

Візуалізація даних є важливим інструментом подання інформації про якість повітря широкої аудиторії. Це може включати відображення поточних рівнів забруднення на картах в режимі реального часу, побудова графіків динаміки забруднення в часі, а також надання зведеної інформації та звітів про стан якості повітря в регіоні.

Бездротові сенсорні мережі для моніторингу якості повітря мають низку переваг у порівнянні з традиційними методами, включаючи нижчу вартість розгортання та експлуатації, можливість створення мереж з високою

щільністю вузлів, отримання даних у режимі реального часу та можливість охоплення великих територій.

Однак вони також мають свої обмеження, такі як нижча точність та стабільність деяких типів сенсорів порівняно з лабораторним обладнанням, необхідність регулярного калібрування та обслуговування, а також проблеми, пов'язані з енергоживленням та бездротовим зв'язком. Незважаючи на ці обмеження, бездротові сенсорні мережі відіграють все більш важливу роль у моніторингу якості повітря та наданні цінної інформації для прийняття рішень у галузі охорони навколишнього середовища та охорони здоров'я [31].

Для подальшого розширення розділу можна заглибитись у питання інтеграції даних із різних джерел, нормативних вимог та стандартів, застосування у різних галузях, а також перспективних напрямів розвитку.

Інтеграція даних із різних джерел є важливим аспектом для отримання більш повної картини якості повітря. Крім даних від бездротових сенсорних мереж, можуть використовуватися дані зі стаціонарних станцій моніторингу, метеорологічні дані (температура, вологість, вітер, опади), дані про трафік, промислові викиди і навіть краудсорсингові дані (наприклад, повідомлення користувачів про запахи або видиме забруднення).

Інтеграція цих різномірних даних вимагає розробки спеціальних алгоритмів та платформ, здатних об'єднувати, синхронізувати та аналізувати інформацію з різних форматів та з різною просторово-часовою резольюцією. Методи машинного навчання можуть бути використані для виявлення прихованих залежностей та покращення точності оцінок якості повітря на основі інтегрованих даних [32].

Нормативні вимоги та стандарти в галузі моніторингу якості повітря визначають перелік контрольованих забруднюючих речовин, гранично допустимі концентрації (ГДК), методи вимірювань та вимоги до точності обладнання. При розробці та розгортанні бездротових сенсорних мереж для моніторингу якості повітря необхідно враховувати ці нормативні вимоги та прагнути до того, щоб дані, які отримуються за їх допомогою, були порівняні

з даними, які отримують традиційні методи. Хоча бездротові сенсорні мережі можуть не завжди відповідати суворим вимогам до точності, що висуваються до еталонного обладнання, вони можуть надавати цінну додаткову інформацію про просторовий розподіл забруднення та динаміку його зміни, що може бути використане для доповнення даних стаціонарних станцій та виявлення зон підвищеного ризику. Існують також міжнародні та національні стандарти, що регламентують характеристики датчиків якості повітря та вимоги до систем моніторингу [33].

Застосування бездротових сенсорних мереж для моніторингу якості повітря охоплює широкий спектр областей. У міському середовищі такі мережі можуть використовуватися для моніторингу забруднення поблизу доріг, промислових зон, житлових кварталів, парків та шкіл, надаючи інформацію про вплив забруднення на здоров'я населення та допомагаючи у розробці заходів щодо покращення якості повітря.

У промисловості вони можуть застосовуватися для контролю викидів забруднюючих речовин та забезпечення дотримання екологічних норм. У сільському господарстві можуть використовуватися для моніторингу рівня аміаку та інших газів, що впливають на якість повітря та здоров'я тварин. У екологічних дослідженнях такі мережі можуть застосовуватися вивчення поширення забруднюючих речовин, впливу лісових пожеж чи вулканічної активності на якість повітря.

Перспективні напрямки розвитку в галузі моніторингу якості повітря з використанням бездротових сенсорних мереж включають розробку більш точних, стабільних та селективних сенсорів із низьким енергоспоживанням та вартістю. Активно ведуться дослідження в галузі нових матеріалів для сенсорів (наприклад, наноматеріалів, металорганічних каркасів), а також в галузі мініатюризації та інтеграції сенсорів. Розвиваються інтелектуальні алгоритми обробки та аналізу даних, включаючи методи машинного навчання та штучного інтелекту, для покращення точності прогнозування та виявлення джерел забруднення. Велика увага приділяється питанням калібрування та

забезпечення достовірності даних, у тому числі розробці методів калібрування на місці експлуатації та використання мереж опорних датчиків. Також розвивається інтеграція даних від сенсорних мереж з іншими інформаційними системами та платформами, такими як системи розумного міста та платформи відкритих даних, для надання інформації про якість повітря широкому загалу та зацікавленим сторонам. Розвиток стандартизації та протоколів обміну даними також сприятиме ширшому впровадженню бездротових сенсорних мереж для моніторингу якості повітря [34].

Таким чином, моніторинг якості повітря з використанням бездротових сенсорних мереж є областю, що динамічно розвивається, поєднує в собі досягнення в області сенсорних технологій, бездротового зв'язку, обробки даних та інформаційних технологій. Подальший розвиток у цих напрямках дозволить створювати більш ефективні, надійні та інформативні системи для контролю та покращення якості повітря, що має важливе значення для здоров'я людини та стану навколишнього середовища.

2.2 Моніторинг рівня шуму

Бездротові сенсорні мережі можуть забезпечити безперервний, розподілений та економічно ефективний моніторинг рівня шуму в різних локаціях, надаючи детальну інформацію про просторово-часові характеристики шумового забруднення.

Для моніторингу рівня шуму використовуються акустичні сенсори або мікрофони, які перетворюють звукові хвилі в електричні сигнали. Характеристики мікрофонів, такі як чутливість, частотний діапазон та тип (наприклад, електретні, MEMS), відіграють важливу роль у точності та діапазоні вимірювань. Електретні мікрофони є поширеним вибором завдяки їх компактності, щодо низької вартості та прийнятним характеристикам для більшості завдань моніторингу шуму. MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems) мікрофони відрізняються ще меншими розмірами та низьким

енергоспоживанням, що робить їх привабливими для інтеграції в бездротові сенсорні вузли [35].

Принцип роботи мікрофона заснований на перетворенні механічних коливань діафрагми, викликаних звуковими хвилями, електричний сигнал. Розмір цього сигналу пропорційна звуковому тиску. Для отримання кількісної оцінки рівня шуму, електричний сигнал від мікрофона посилюється, фільтрується (для обліку частотних характеристик звуку, наприклад, з використанням А-зважування, яке імітує чутливість людського вуха до різних частот), а потім оцифровується за допомогою аналого-цифрового перетворювача (АЦП). Оцифровані дані обробляються мікроконтролером для розрахунку різних акустичних параметрів, таких як еквівалентний рівень звуку (L_{eq}), максимальний рівень звуку (L_{max}), мінімальний рівень звуку (L_{min}), а також статистичні рівні (наприклад, L_{10} , L_{50} , L_{90}), які являють собою рівні звуку, що перевищують.

Розгортання бездротової сенсорної мережі для моніторингу рівня шуму потребує ретельного планування розміщення сенсорних вузлів. Вузли можуть бути розташовані поблизу джерел шуму (наприклад, автомагістралей, аеропортів, промислових підприємств, будівельних майданчиків), у житлових районах для оцінки впливу на населення, у зонах відпочинку та парках для контролю акустичного комфорту, а також поблизу чутливих об'єктів (наприклад, лікарень, шкіл). Щільність розміщення вузлів може залежати від цілей моніторингу та просторової мінливості шумового поля.

Енергоефективність є важливим аспектом при розробці бездротових сенсорних вузлів для моніторингу шуму, оскільки безперервне вимірювання та обробка звукових сигналів можуть бути енергоємними. Застосування циклічних режимів роботи, за яких вузли активуються для вимірювань через певні інтервали часу, допоможе знизити загальне енергоспоживання. Однак інтервал між вимірами має бути досить малим, щоб не пропустити важливі події шуму. Використання мікрофонів з низьким енергоспоживанням та

оптимізація алгоритмів обробки сигналу також сприяють збільшенню терміну служби батарей.

Калібрування акустичних сенсорів є важливим для забезпечення точності вимірювань рівня шуму. Калібрування зазвичай проводиться з використанням акустичних калібраторів, що генерують звук відомого рівня звукового тиску на певній частоті. Періодичність калібрування залежить від типу мікрофона та умов експлуатації [36].

Обробка та аналіз даних, отриманих від мережі датчиків шуму, може включати в себе усереднення рівнів шуму за певні періоди часу (наприклад, за годину, за добу), побудова карт шумового забруднення з використанням методів інтерполяції, виявлення джерел шуму на основі просторово-часових характеристик звукових подій, а також аналіз спектральних характеристик шуму для визначення побутовий шум).

Візуалізація даних моніторингу рівня шуму може включати відображення карт шумового забруднення з колірним кодуванням рівнів звуку, побудова графіків зміни рівня шуму в часі в різних точках моніторингу, а також представлення статистичних показників шумового режиму.

Застосування бездротових сенсорних мереж для моніторингу рівня шуму має низку переваг, включаючи можливість безперервного та розподіленого моніторингу, відносно низьку вартість розгортання та експлуатації в порівнянні з традиційними стаціонарними постами, а також можливість отримання даних у режимі реального часу. Ці дані можуть бути використані для оцінки впливу шумового забруднення на здоров'я населення, планування міського середовища, розробки заходів щодо зниження рівня шуму та контролю за дотриманням нормативних вимог.

Однак існують певні проблеми та обмеження, пов'язані з використанням бездротових сенсорних мереж для моніторингу шуму. Точність недорогих мікрофонів може бути нижчою, ніж у професійного акустичного обладнання.

На результати вимірювання можуть впливати погодні умови (наприклад, вітер, дощ) та сторонні шуми. Необхідно розробляти надійні алгоритми

обробки сигналу для фільтрації небажаних шумів та забезпечення точності вимірювань. Також важливими є питання калібрування та забезпечення довгострокової стабільності роботи сенсорів в умовах навколишнього середовища.

Незважаючи на ці виклики, розвиток технологій бездротового зв'язку, мікроелектроніки та обробки сигналів робить бездротові сенсорні мережі все більш перспективним інструментом для ефективного та масштабного моніторингу рівня шуму у міському та промисловому середовищі.

2.3 Моніторинг забруднення води

Моніторинг забруднення води за допомогою бездротових сенсорних мереж включає виявлення і вимірювання різних фізичних, хімічних і біологічних параметрів, які можуть вказувати на наявність забруднюючих речовин і оцінювати загальну якість води.

До таких параметрів відносяться температура, рН, електропровідність (соміст), розчинений кисень (DO), каламутність, окислювально-відновний потенціал (ОВП), а також концентрація специфічних іонів (наприклад, нітратів, фосфатів, хлоридів), важких металів, органічних сполук та біологічних індикаторів (наприклад, для вимірювання цих параметрів використовують різні типи датчиків, які можуть бути занурюваними або контактними).

Датчики температури зазвичай ґрунтуються на термісторах або напівпровідникових елементах. Датчики рН використовують електрохімічні принципи, вимірюючи різницю потенціалів між вимірювальним та опорним електродом, що залежить від концентрації іонів водню. Датчики електропровідності вимірюють здатність води проводити електричний струм, що залежить від концентрації розчинених іонів. Датчики розчиненого кисню можуть бути амперометричними (на основі електрохімічної реакції) або оптичними (на основі гасіння флуоресценції киснем).

Датчики каламутності зазвичай працюють за оптичним принципом, вимірюючи розсіювання світла завислими частинками. Датчики ОВП вимірюють здатність води віддавати або приймати електрони, що є індикатором її окисно-відновних властивостей.

Іоноселективні електроди (ISE) використовуються для вимірювання концентрації специфічних іонів. Датчики важких металів можуть бути електрохімічними чи оптичними (наприклад, флуоресцентними). Датчики органічних сполук можуть бути засновані на оптичних методах (наприклад УФ-спектроскопії) або електрохімічних принципах. Біологічні датчики можуть вимірювати концентрацію хлорофілу чи активність мікроорганізмів.

Розгортання бездротової сенсорної мережі для моніторингу забруднення води вимагає врахування специфічних умов водного середовища. Сенсорні вузли та датчики повинні бути водонепроникними та стійкими до корозії. Необхідно забезпечити надійне кріплення та захист обладнання від течій, хвиль та механічних пошкоджень. Передача даних під водою може бути утруднена з-за високого поглинання радіохвиль, тому можуть використовуватися альтернативні методи бездротового зв'язку. У більшості випадків сенсорні вузли розміщуються на поверхні води (наприклад, на буюх або плавучих платформах) із занурювальними датчиками, з'єднаними кабелями.

Енергоефективність є критично важливою для забезпечення тривалої автономної роботи системи, особливо у віддалених водних об'єктах. Використання датчиків з низьким енергоспоживанням, застосування циклічних режимів роботи та використання альтернативних джерел енергії (наприклад, сонячних панелей на буюх) є ключовими стратегіями [37].

Калібрування датчиків води є складним завданням через нестабільність характеристик сенсорів у водному середовищі та необхідність урахування впливу температури, тиску та інших факторів. Рекомендується проводити періодичне калібрування з використанням стандартних розчинів та еталонного

обладнання. Деякі параметри можуть застосовувати методи калібрування на місці експлуатації.

Обробка та аналіз даних, отриманих від мережі датчиків води, включає валідацію даних, корекцію показань з урахуванням впливу зовнішніх факторів, агрегацію даних, виявлення аномальних значень, а також застосування статистичних методів і гідрологічних моделей для оцінки поширення забруднення та прогнозування якості води.

Візуалізація даних моніторингу забруднення води може включати відображення карт якості води з колірним кодуванням різних параметрів, побудова графіків часових рядів для відстеження динаміки забруднення, а також подання зведених звітів і аналітичних висновків.

Застосування бездротових сенсорних мереж для моніторингу забруднення води надає ряд значних переваг, включаючи можливість безперервного моніторингу в режимі реального часу, охоплення великих територій і важкодоступних місць, раннє виявлення забруднення, зниження витрат на ручний відбір проб та лабораторний аналіз, а також надання даних запобігання екологічним катастрофам.

Однак існують і певні проблеми, такі як складність забезпечення надійного бездротового зв'язку під водою, необхідність захисту обладнання від агресивного водного середовища, проблеми з біообростанням датчиків, а також вимоги до точності та стабільності вимірювань. Подальші дослідження та розробки в галузі підводних сенсорних технологій, енергоефективних рішень та алгоритмів обробки даних сприятимуть ширшому та ефективному застосуванню бездротових сенсорних мереж для моніторингу забруднення води та охорони водних ресурсів.

Для подальшого розширення розділу можна детальніше розглянути специфічні типи забруднювачів та методи їх виявлення, проблеми біообростання та методи боротьби з ним, питання забезпечення надійності та довговічності обладнання у водному середовищі, а також інтеграцію із системами моделювання водних потоків та якості води [38].

Розглянемо докладніше специфічні типи забруднювачів та методи їх виявлення. Крім загальних параметрів якості води, бездротові сенсорні мережі можуть бути адаптовані для моніторингу конкретних забруднювачів, що становлять особливий інтерес залежно від регіону чи джерела забруднення. Наприклад, у районах інтенсивного сільського господарства можуть бути важливими датчики для виявлення нітратів і фосфатів, що викликають евтрофікацію водойм [39].

Поблизу промислових підприємств можуть знадобитися датчики моніторингу важких металів (наприклад, ртуті, свинцю, кадмію) або специфічних органічних сполук. Для виявлення нафтопродуктів можуть використовуватись оптичні або флуоресцентні датчики. Для моніторингу біологічного забруднення (наприклад, фекальних коліформ) розробляються біосенсори, засновані на імунохімічних або ДНК-аналітичних методах. Розвиток селективних та чутливих сенсорів для широкого спектру забруднювачів є активною областю досліджень.

Проблема біообростання (fouling) є серйозною перешкодою для довгострокової роботи занурювальних датчиків. На поверхні датчиків можуть осідати мікроорганізми, водорості та інші біологічні матеріали, що призводить до спотворення показань та зниження чутливості. Для боротьби з біообростанням використовуються різні методи, включаючи механічне очищення (наприклад, за допомогою щіток або ультразвуку), хімічну обробку (наприклад, нанесення покриттів, що обгортають) і електрохімічні методи. Вибір методу залежить від типу датчика, умов водного середовища та тривалості автономної роботи системи. Розробка сенсорів, що самоочищаються, є перспективним напрямком [40].

Забезпечення надійності та довговічності обладнання у водному середовищі вимагає застосування спеціальних матеріалів та конструкцій, стійких до корозії, високого тиску (на великих глибинах) та механічних впливів. Герметизація електронних компонентів та кабельних з'єднань є критично важливою для запобігання попаданню води та виходу обладнання з

ладу. Регулярне технічне обслуговування та інспекція обладнання необхідні для своєчасного виявлення та усунення потенційних проблем.

Інтеграція даних моніторингу із системами моделювання водних потоків та якості води може значно підвищити цінність інформації, що отримується від бездротових сенсорних мереж. Гідродинамічні моделі можуть використовуватися для прогнозування поширення забруднюючих речовин на основі даних про течії та рельєф дна.

Моделі якості води можуть враховувати різні фізичні, хімічні та біологічні процеси, що впливають на трансформацію та перенесення забруднювачів. Інтеграція даних реального часу від сенсорної мережі в ці моделі дозволяє поліпшити їх точність та оперативність, а також використовувати їх для прогнозування сценаріїв забруднення та оцінки ефективності заходів щодо його запобігання та ліквідації. Розробка платформ для інтеграції сенсорних даних із моделями та інструментами візуалізації є важливим напрямком розвитку інтелектуальних систем управління водними ресурсами [41].

Крім того, варто згадати про нормативно-правові аспекти моніторингу забруднення води. У різних країнах та регіонах існують свої стандарти якості води та вимоги до систем моніторингу. При розробці та впровадженні бездротових сенсорних мереж необхідно враховувати ці вимоги та прагнути до того, щоб дані могли бути використані для цілей державного контролю та звітності.

Нарешті, освітні та суспільні аспекти також відіграють важливу роль. Надання громадськості інформації щодо якості води в режимі реального часу може підвищити поінформованість про проблеми забруднення та сприяти більш відповідальному водокористуванню. Розробка простих і зрозумілих інтерфейсів візуалізації даних може зробити доступною для широкого кола користувачів.

Таким чином, моніторинг забруднення води з використанням бездротових сенсорних мереж є складним та багатогранним завданням, що

потребує врахування безлічі технічних, екологічних та соціальних факторів. Подальший розвиток технологій сенсорів, бездротового зв'язку, обробки даних та моделювання дозволить створювати більш ефективні та надійні системи для охорони та сталого управління водними ресурсам

2.4 Моніторинг кліматичних параметрів

Бездротові сенсорні мережі надають гнучку та економічно ефективну інфраструктуру для розгортання великої кількості метеорологічних датчиків у різних географічних точках, забезпечуючи отримання детальних даних, які можуть бути використані для широкого кола додатків, включаючи метеорологічні прогнози, вивчення змін клімату, сільськогосподарське планування, управління водними ресурсами.

Для вимірювання температури повітря та поверхні використовуються різні типи сенсорів, такі як термістори, термопари, резистивні температурні детектори (RTD) та інфрачервоні (ІЧ) термометри. Термістори та RTD відрізняються високою точністю у вузьких діапазонах температур, в той час як термопари можуть вимірювати ширший діапазон, але з меншою точністю. ІЧ-термометри дозволяють безконтактно вимірювати температуру поверхні, що корисно для моніторингу температури ґрунту, рослинності чи водних об'єктів [42].

Датчики вологості можуть бути ємнісними, резистивними або теплопровідними і вимірюють вміст водяної пари в повітрі, яке може бути виражене у вигляді відносної вологості (відсотковий вміст водяної пари щодо максимально можливої при даній температурі) або абсолютної вологості (маса водяної пари в одиниці об'єму повітря).

Атмосферний тиск зазвичай вимірюється барометричними датчиками, які можуть бути ємнісними, п'єзорезистивними або механічними. Точні вимірювання атмосферного тиску важливі для метеорологічного аналізу та прогнозування погоди. Швидкість і напрям вітру вимірюються анемометрами

(різних типів, включаючи чашкові, крильчасті та ультразвукові) та флюгерами. Ультразвукові анемометри не мають частин, що рухаються, і забезпечують високу точність вимірювань у широкому діапазоні швидкостей і напрямків. Кількість опадів вимірюється дощомірами різних конструкцій, включаючи ковші, що перекидаються, і вагові датчики [43].

Сонячна радіація є ключовим фактором, що впливає на клімат та екосистеми. Вона може вимірюватися піранометрами (для вимірювання повної сонячної радіації) та піргеометрами (для вимірювання довгохвильової інфрачервоної радіації).

Спектральний склад сонячної радіації може бути вимірний за допомогою спектрорадіометрів. Характеристики хмарності можуть оцінюватися за допомогою інфрачервоних радіометрів, які вимірюють випромінювання хмар, або за допомогою оптичних датчиків, що реєструють ступінь покриття хмарами неба і їх тип. Датчики туману можуть бути засновані на оптичному розсіюванні світла або на вимірі вологості та видимості.

Розгортання бездротової сенсорної мережі для моніторингу кліматичних параметрів вимагає врахування специфічних вимог кожного типу датчика до розміщення (наприклад, захист від прямого сонячного випромінювання та опадів для датчиків температури та вологості, відкритий простір для датчиків вітру та сонячної радіації), а також забезпечення надійного живлення та бездротового зв'язку в різних погодних умовах. Енергоефективність є важливим аспектом, особливо для автономно працюючих метеостанцій. Використання сонячних панелей та акумуляторів може забезпечити тривалу роботу у віддалених районах.

Калібрування кліматичних датчиків є критично важливим для забезпечення точності та сумісності даних. Рекомендується проводити періодичне калібрування з використанням еталонного обладнання та дотримуватися рекомендацій виробників. Для деяких параметрів (наприклад,

температури та вологості) можуть існувати стандартні процедури калібрування [44].

Обробка та аналіз даних, отриманих від кліматичних сенсорних мереж, включає валідацію даних, корекцію систематичних помилок (наприклад, температурної залежності), агрегацію даних за певні часові інтервали, просторову інтерполяцію для створення карт розподілу кліматичних параметрів, а також застосування статистичних методів і кліматичних моделей для аналізу трендів, виявлення аномалій та прогнозування майбутніх кліматичних умов.

Візуалізація даних кліматичного моніторингу може включати побудову графіків часових рядів, карт розподілу температури, вологості, вітру і опадів, а також створення анімацій, що демонструють динаміку зміни кліматичних параметрів. Ці візуалізації можуть бути корисні для вчених, політиків, сільськогосподарських виробників та широкого загалу [45].

Застосування бездротових сенсорних мереж для моніторингу кліматичних параметрів надає ряд переваг, включаючи можливість створення мереж з високою щільністю вузлів, охоплення великих і важкодоступних територій, отримання даних в режимі реального часу, відносно низьку вартість розгортання та експлуатації в порівнянні з традиційними метеостанціями, а також гнучкість вибору. Ці дані можуть значно покращити наше розуміння кліматичних процесів та сприяти прийняттю більш обґрунтованих рішень у галузі адаптації до зміни клімату та пом'якшення його наслідків [46].

Для подальшого розширення розділу можна поглибитися в питання калібрування та забезпечення точності вимірювань, енергопостачання автономних метеостанцій, а також застосування даних кліматичного моніторингу в різних галузях.

Калібрування та забезпечення точності вимірювань є критично важливими для отримання достовірних кліматичних даних. Кожен тип кліматичного датчика має свої особливості та потребує специфічних методів калібрування.

Датчики температури можуть калібруватися з використанням термостатів та еталонних термометрів у кількох температурних точках. Датчики вологості можуть калібруватися за допомогою камер вологості або сольових розчинів, що створюють відому вологість. Барометричні датчики калібруються за еталонними барометрами [47].

Анемометри можуть калібруватися в аеродинамічних трубах. Піранометри та піргеометри вимагають калібрування за еталонними джерелами випромінювання. Важливо враховувати вплив умов довкілля (температури, вологості, тиску) на характеристики датчиків та проводити відповідну компенсацію. Регулярна перевірка та калібрування датчиків, а також використання багатоточкового калібрування можуть значно підвищити точність вимірювань.

Енергопостачання автономних метеостанцій, що працюють на базі бездротових сенсорних мереж, є ключовим фактором, що визначає їх довговічність та можливість розгортання у віддалених районах. Крім використання сонячних панелей та акумуляторів, можуть застосовуватися й інші технології збирання енергії, такі як вітрогенератори малого розміру, термоелектричні генератори (які використовують різницю температур між землею та повітрям) та п'єзоелектричні генератори (що використовують вібрацію від вітру) [48].

Гібридні системи енергопостачання, що поєднують кілька джерел енергії, можуть забезпечити більш надійне та стабільне живлення. Ефективне керування енергоспоживанням, що включає оптимізацію режимів роботи датчиків і радіомодулів, а також використання енергоефективних протоколів зв'язку також відіграє важливу роль у продовженні терміну служби автономних метеостанцій.

Застосування даних кліматичного моніторингу за допомогою бездротових сенсорних мереж охоплює широкий спектр областей. У сільському господарстві дані про температуру, вологість ґрунту та повітря, кількість опадів та сонячної радіації можуть використовуватися для

оптимізації поливу, внесення добрив, прогнозування врожайності та прийняття рішень про строки посіву та збирання врожаю [49].

В управлінні водними ресурсами дані про кількість опадів, випаровування та вологість ґрунту важливі для прогнозування водного балансу, управління водосховищами та іригаційними системами. У моніторингу стихійних лих дані про швидкість та напрям вітру, кількість опадів та атмосферний тиск можуть використовуватися для прогнозування штормів, повеней та інших небезпечних погодних явищ [50].

В екології дані про температуру, вологість, освітленість та радіацію використовуються для вивчення впливу клімату на рослинність та тваринний світ, а також для моніторингу змін в екосистемах. У містобудуванні та енергетиці дані про температуру, вітер та сонячну радіацію можуть використовуватися для проектування енергоефективних будівель та оптимізації роботи систем опалення, вентиляції та кондиціонування повітря, а також для оцінки потенціалу використання відновлюваних джерел енергії. У охороні здоров'я дані про температуру та вологість можуть використовуватися для прогнозування поширення захворювань, пов'язаних з погодними умовами.

Таким чином, бездротові сенсорні мережі надають потужний інструмент для детального та розподіленого моніторингу кліматичних параметрів, відкриваючи нові можливості для досліджень та практичних застосувань у різних секторах економіки та науки. Подальший розвиток сенсорних технологій, енергоефективних рішень та методів обробки даних сприятиме розширенню використання цих мереж для вирішення актуальних завдань, пов'язаних із зміною клімату та стійким розвитком.

РОЗДІЛ 3 ПЕРЕВАГИ ТА ОБМЕЖЕННЯ БЕЗДРОВОЇ СЕНСОРНОЇ СИСТЕМИ

3.1 Переваги використання бездротових сенсорів

Використання бездротових сенсорів пропонує цілий ряд значних переваг, які роблять їх особливо привабливими для широкого спектру програм моніторингу, включаючи контроль якості повітря та води, моніторинг кліматичних параметрів, відстеження рівня шуму та багато іншого.

Однією з найбільш очевидних переваг є зниження витрат на розгортання та обслуговування. Традиційні системи моніторингу часто вимагають прокладання дорогих кабельних мереж для передачі даних та живлення датчиків. Бездротові сенсори усувають цю необхідність, значно знижуючи витрати на матеріали та трудомісткість монтажних робіт. Крім того, відсутність проводів спрощує масштабування системи та додавання нових сенсорних вузлів до вже існуючої інфраструктури [51].

Обслуговування бездротових сенсорів також може бути менш витратним, особливо у важкодоступних місцях, оскільки багато вузлів можуть працювати автономно від батарей або альтернативних джерел енергії протягом тривалих періодів часу, мінімізуючи потребу у частому фізичному доступі.

Іншою важливою перевагою є гнучкість та масштабованість. Бездротові сенсорні мережі можуть бути легко розгорнуті в найрізноманітніших географічних умовах, включаючи віддалені та важкодоступні райони, де прокладання проводових мереж було б скрутним або неможливим. Додавання нових сенсорних вузлів або зміна конфігурації мережі може бути виконано швидко і без додаткових витрат. Ця гнучкість дозволяє адаптувати систему моніторингу до потреб, що змінюються, і розширювати її покриття в міру необхідності.

Можливість отримання даних у режимі реального часу є ще однією ключовою перевагою бездротових детекторів. Дані з датчиків можуть передаватися бездротовими каналами на центральний вузол або в хмару практично миттєво, що дозволяє здійснювати безперервний моніторинг і оперативно реагувати на зміни в навколишньому середовищі або виникнення нештатних ситуацій, таких як різке забруднення повітря або води, екстремальні погодні явища або перевищення допустимих рівнів. Інформація в режимі реального часу критично важлива для систем раннього попередження та вживання своєчасних заходів щодо mitigation наслідків [52].

Бездротові сенсорні мережі забезпечують високу щільність покриття та просторову роздільну здатність моніторингу. Розгортання великої кількості недорогих бездротових сенсорних вузлів дозволяє отримати детальну картину розподілу контрольованих параметрів на значній території.

Це особливо важливо для моніторингу забруднення повітря в міських умовах, де рівні забруднення можуть значно змінюватись в залежності від місця розташування, або для відстеження мікрокліматичних змін у сільськогосподарських угіддях. Висока просторова роздільна здатність дозволяє виявляти локальні джерела забруднення або зони з особливими екологічними умовами [53].

Використання бездротових сенсорів може сприяти зниженню впливу на довкілля в порівнянні з традиційними методами моніторингу, які можуть вимагати будівництва капітальних споруд або частого використання транспортних засобів для відбору проб. Автономна робота багатьох бездротових сенсорних вузлів із живленням від батарей або відновлюваних джерел енергії також знижує їх вуглецевий слід.

Бездротові сенсорні мережі можуть бути інтегровані з іншими інформаційними системами та платформами, такими як системи географічної інформації (ГІС), хмарні послуги зберігання та обробки даних, а також платформи візуалізації та аналітики. Ця інтеграція дозволяє об'єднувати дані

моніторингу з іншою релевантною інформацією, проводити комплексний аналіз та подавати результати у зручному для користувача форматі [54].

Нарешті, розвиток технологій бездротового зв'язку та мікроелектроніки призвело до зниження вартості самих сенсорів та радіомодулів, а також до збільшення їхньої продуктивності та енергоефективності. Це робить бездротові сенсорні мережі все більш доступним та економічно привабливим рішенням для широкого кола завдань моніторингу навколишнього середовища.

Автоматизація процесів моніторингу є одним із ключових переваг використання бездротових сенсорних мереж. Традиційні методи моніторингу часто вимагають ручного збору проб, проведення лабораторних аналізів та обробки даних, що є трудомістким, дорогим і схильним до людських помилок. Бездротові сенсорні мережі дозволяють автоматизувати весь цикл моніторингу, від збору даних датчиками до їх передачі, зберігання та аналізу. Це знижує потребу в ручній праці, підвищує оперативність отримання результатів та забезпечує безперервність процесу моніторингу. Автоматизація також дозволяє проводити моніторинг у важкодоступних чи небезпечних для людини середовищах [55].

Покращення безпеки та доступності даних також є важливою перевагою. Бездротові сенсорні мережі можуть бути спроектовані з використанням різних механізмів безпеки для захисту даних, що передаються, від несанкціонованого доступу та модифікації. Шифрування даних, автентифікація пристроїв та безпечні протоколи передачі забезпечують конфіденційність та цілісність інформації.

Централізоване зберігання даних у хмарних сервісах або серверах забезпечує їх доступність для авторизованих користувачів з будь-якої точки світу, що полегшує спільну роботу, аналіз та прийняття рішень на основі отриманої інформації. Крім того, автоматичне резервне копіювання даних підвищує їх збереження та запобігає втраті важливої інформації [56].

Використання бездротових сенсорних мереж відкриває широкі можливості для інноваційних програм та досліджень у галузі моніторингу навколишнього середовища. Можливість отримання великих обсягів даних з високим просторово-часовим дозволом дозволяє проводити більш глибокий аналіз екологічних процесів, виявляти приховані закономірності та розробляти більш точні моделі прогнозування.

Інтеграція даних з іншими джерелами інформації (наприклад, супутниковими знімками, соціальними мережами) може призвести до нових відкриттів та розуміння складних взаємодій в екосистемах. Можливість розгортання спеціалізованих сенсорних мереж на вирішення конкретних завдань моніторингу (наприклад, відстеження міграції тварин, моніторинг стану лісів, контролю над станом ґрунту) стимулює розвиток міждисциплінарних досліджень [57].

Крім того, бездротові сенсорні мережі сприяють залученню громадян до моніторингу навколишнього середовища (citizen science). Розробка недорогих та простих у використанні сенсорних вузлів дозволяє звичайним людям збирати та передавати дані про стан навколишнього середовища у своїх районах. Це може призвести до значного збільшення обсягу доступних даних та підвищення обізнаності громадськості щодо екологічних проблем. Платформи для збору та візуалізації краудсорсингових даних можуть стати цінним доповненням до професійних систем моніторингу [58].

Нарешті, варто відзначити підвищення стійкості до відмови системи при використанні бездротових сенсорних мереж з пористою топологією (mesh networks). У таких мережах кожен вузол може бути ретранслятором, передаючи дані від інших вузлів. Якщо один з вузлів виходить з ладу, дані можуть бути перенаправлені іншим шляхом, що забезпечує безперервність роботи всієї мережі.

Таким чином, переваги використання бездротових сенсорів у системах моніторингу навколишнього середовища включають зниження витрат, гнучкість та масштабованість, отримання даних у режимі реального часу,

високий просторовий дозвіл, потенційне зниження впливу на довкілля, можливість інтеграції з іншими системами та зниження вартості обладнання. Ці переваги роблять бездротові сенсорні мережі потужним інструментом для отримання детальної та своєчасної інформації про стан навколишнього середовища, необхідну для наукових досліджень, прийняття управлінських рішень та покращення якості життя населення.

3.2 Обмеження в роботі бездротових сенсорів

Цей розділ у контексті систем моніторингу навколишнього середовища є не менш важливим, ніж обговорення їх переваг, оскільки розуміння цих обмежень дозволяє реалістично оцінювати можливості технології та розробляти стратегії їхньої мінімізації чи обходу. Незважаючи на численні переваги, бездротові сенсорні мережі стикаються з низкою істотних обмежень, які необхідно враховувати при проектуванні, розгортанні та експлуатації систем моніторингу.

Одним із ключових обмежень є обмеженість ресурсів сенсорних вузлів, зокрема, обчислювальної потужності, обсягу пам'яті та, найголовніше, енергії. Більшість сенсорних вузлів бездротового зв'язку є малопотужними пристроями, що працюють від батарей або альтернативних джерел енергії з обмеженою ємністю. Це накладає жорсткі обмеження на складність алгоритмів обробки даних, обсяг інформації, що зберігається, і частоту передачі даних. Енергоспоживання є критичним фактором, що визначає термін служби сенсорного вузла та всієї мережі, особливо при розгортанні великої кількості вузлів у віддалених або важкодоступних місцях, де заміна батарей може бути скрутною або дорогою.

Іншим суттєвим обмеженням є ненадійність бездротового зв'язку. Якість бездротового каналу зв'язку може зазнавати впливу безлічі факторів, включаючи відстань між вузлами, наявність перешкод (будівель, рослинності, рельєфу місцевості), інтерференцію від інших радіопристроїв, погодні умови

(дощ, туман) та електромагнітні перешкоди. Втрата пакетів даних, затримки в передачі та нестабільність з'єднання можуть знизити надійність та своєчасність доставки інформації, що критично для додатків моніторингу, які потребують даних у режимі реального часу.

Обмежена пропускна здатність бездротових каналів зв'язку також може бути проблемою, особливо при передачі великих обсягів даних або за високої щільності сенсорних вузлів, що одночасно передають інформацію. Пропускна здатність може стати вузьким місцем, що обмежує частоту збору даних або складність інформації, що передається (наприклад, передачу зображень або відео).

Безпека даних є ще одним важливим обмеженням. Бездротові канали зв'язку піддаються ризику перехоплення, прослуховування та несанкціонованого доступу до даних. Забезпечення конфіденційності, цілісності та справжності інформації, що передається, вимагає застосування криптографічних методів і протоколів безпеки, які, у свою чергу, можуть збільшувати енергоспоживання та обчислювальне навантаження на сенсорні вузли.

Точність і надійність самих сенсорів також можуть бути обмежені, особливо при використанні недорогих сенсорів, які часто застосовуються в бездротових сенсорних мережах для забезпечення економічності та масштабованості. Характеристики сенсорів можуть залежати від умов навколишнього середовища (температури, вологості, хімічних впливів), згодом може відбуватися дрейф калібрувальних характеристик, і вони можуть бути піддані впливу перехресної чутливості до інших речовин або фізичних явищ. Забезпечення точності та надійності даних потребує ретельного калібрування, компенсації зовнішніх впливів та періодичного обслуговування.

Проблеми масштабованості можуть виникати при розгортанні великих мереж з сотнями або тисячами сенсорних вузлів. Управління такою мережею, маршрутизація даних, агрегація інформації та забезпечення синхронізації можуть становити значні технічні складності.

Вразливість до фізичних впливів та умов навколишнього середовища також є обмеженням. Сенсорні вузли, розміщені в польових умовах, можуть зазнавати впливу екстремальних температур, вологості, пилу, вібрації, а також вандалізму або випадкових пошкоджень. Забезпечення фізичного захисту та стійкості обладнання потребує використання спеціальних корпусів та матеріалів, що може збільшувати вартість та габарити сенсорних вузлів.

Вплив топології мережі на обмеження є значним. Наприклад, у зіркоподібній топології, де всі вузли безпосередньо взаємодіють із центральним вузлом, відмова центрального вузла може призвести до виходу з ладу всієї мережі. Крім того, велика кількість вузлів, що одночасно передають дані центральному вузлу, може викликати перевантаження та колізії.

У пористої топології (mesh network), хоч і забезпечується краща стійкість до відмови за рахунок можливості багатокрокової передачі даних, зростає складність маршрутизації та управління мережею, а також може збільшуватися затримка доставки даних і енергоспоживання проміжних вузлів, що виступають як ретранслятори. Вибір топології повинен здійснюватися з урахуванням вимог конкретної програми та компромісу між різними характеристиками.

Проблеми синхронізації часу в розподілених мережах можуть виникати через відсутність загального проводового з'єднання та затримок бездротової передачі сигналів. Точна синхронізація часу між сенсорними вузлами може бути критично важлива для деяких програм моніторингу, наприклад, для кореляції подій, що відбуваються в різних точках мережі, або для реалізації тимчасових схем агрегації даних. Досягнення високої точності синхронізації вимагає використання спеціальних протоколів синхронізації часу, які можуть споживати додаткову енергію та пропускну здатність.

Обмеження, пов'язані з протоколами зв'язку, також слід враховувати. Різні стандарти бездротового зв'язку (наприклад, Bluetooth LE, LoRaWAN, Zigbee) мають свої компроміси між дальністю зв'язку, пропускну здатністю та енергоспоживанням. Вибір невідповідного протоколу може призвести до

обмежень у дальності передачі, обсягу даних, що передаються, або часу автономної роботи сенсорних вузлів. Крім того, деякі протоколи можуть бути більш схильні до інтерференції або мати обмеження щодо кількості підтримуваних вузлів у мережі.

Правові та етичні аспекти використання бездротових сенсорних мереж також можуть створювати обмеження. Розгортання сенсорних мереж може викликати питання щодо приватності зібраних даних, особливо якщо здійснюється моніторинг у громадських місцях чи приватних володіннях. Необхідно дотримуватись відповідних законів та норм, що регулюють збір, зберігання та використання персональних даних.

Крім того, можуть виникати питання про відповідальність за неправильну роботу системи або за наслідки рішень, що приймаються на її основі. Етичні міркування, такі як прозорість використання даних та поінформована згода, також повинні враховуватися при проектуванні та експлуатації бездротових сенсорних мереж.

Варто згадати обмеження, пов'язані із сумісністю та інтероперабельністю різних пристроїв та стандартів. У зв'язку зі швидким розвитком технологій та відсутністю єдиних стандартів для всіх аспектів бездротових сенсорних мереж можуть виникати проблеми при інтеграції пристроїв від різних виробників або при використанні різних протоколів зв'язку в одній системі.

Забезпечення сумісності та інтероперабельності потребує використання стандартизованих інтерфейсів та протоколів, а також розробки проміжного програмного забезпечення або шлюзів для перетворення даних між різними форматами та протоколами.

Нарешті, складність розгортання та управління бездротовими сенсорними мережами, особливо великими та гетерогенними, може бути обмеженням. Потрібні спеціальні знання та інструменти для планування мережі, налаштування обладнання, моніторингу її роботи та усунення несправностей.

Отже, обмеження у роботі бездротових сенсорів є багатограними і охоплюють як технічні аспекти, пов'язані з ресурсами, зв'язком і точністю, а й питання топології мережі, синхронізації часу, протоколів зв'язку, і навіть правові та етичні міркування. Повне розуміння цих обмежень необхідне успішного проектування та впровадження ефективних бездротових сенсорних систем моніторингу довкілля.

3.3 Безпека та конфіденційність даних

Забезпечення безпеки та конфіденційності даних є критично важливим для захисту цілісності системи, запобігання несанкціонованому доступу та використанню інформації, а також для дотримання нормативних вимог та етичних норм. Загрози безпеки в бездротових сенсорних мережах можуть змінюватись від пасивного прослуховування та перехоплення даних до активних атак, таких як впровадження шкідливого коду, заміна вузлів та відмова в обслуговуванні (DoS).

На рівні фізичного шару вразливості можуть містити перехоплення радіосигналів. Для протидії цьому застосовуються методи маскування сигналу та розширення спектра. На каналному рівні поширеною загрозою є колізії пакетів та перехоплення управління доступом до середовища. Використання криптографічних методів для шифрування переданих даних та автентифікації вузлів є ключовим заходом захисту.

На мережному рівні атаки можуть бути спрямовані на маршрутизацію даних, наприклад, шляхом створення неправдивих маршрутів або перенаправлення трафіку. Використання безпечних протоколів маршрутизації та виявлення аномалій у мережному трафіку можуть допомогти у виявленні та запобіганні таких атак. На транспортному та прикладному рівнях також можуть існувати вразливості, пов'язані з протоколами обміну даними та програмним забезпеченням, що працюють на сенсорних вузлах та центральних серверах.

Шифрування даних є одним із основних механізмів забезпечення конфіденційності. Можуть використовуватись різні криптографічні алгоритми, симетричні (наприклад, AES) та асиметричні (наприклад, RSA, ECC). Вибір алгоритму залежить від обчислювальних ресурсів сенсорних вузлів та вимог до рівня безпеки. Для малопотужних пристроїв часто використовуються полегшені криптографічні алгоритми.

Аутентифікація вузлів необхідна для запобігання впровадженню в мережу неавторизованих пристроїв, які можуть використовуватися для атак або збору несанкціонованих даних. Можуть використовуватися різні методи аутентифікації, засновані на ключах, сертифікатах або біометричних даних (хоча останнє менш поширене у стандартних сенсорних мережах).

Управління ключами є складним завданням у бездротових сенсорних мережах через їх розподілений характер та обмежені ресурси вузлів. Необхідно забезпечити безпечне розповсюдження, зберігання та оновлення криптографічних ключів. Можуть використовуватися централізовані чи розподілені схеми керування ключами.

Виявлення вторгнень (Intrusion Detection Systems - IDS) можуть бути розгорнуті на різних рівнях мережі для виявлення підозрілої активності та атак. IDS можуть бути засновані на сигнатурному аналізі (пошуку відомих шаблонів атак) або на поведінковому аналізі (моніторинг відхилень від нормальної поведінки мережі).

Забезпечення цілісності даних гарантує, що інформація, що передається, не була змінена в процесі передачі. Для цього використовуються алгоритми хешування і цифрові підписи.

Крім технічних заходів безпеки, важливу роль відіграє фізична безпека сенсорних вузлів, особливо за умови їх розміщення в загальнодоступних місцях. Захист від несанкціонованого доступу, вандалізму та крадіжки може включати використання захищених корпусів, приховане розміщення та системи виявлення фізичного втручання.

Конфіденційність даних також включає питання анонімізації зібраної інформації, особливо якщо вона може бути пов'язана з конкретними людьми або місцезнаходженнями. Методи агрегації даних та просторово-часової анонімізації можуть використовуватись для зниження ризику ідентифікації окремих осіб.

Дотримання нормативних вимог щодо захисту даних та приватності (наприклад, GDPR, CCPA) також є важливим аспектом. Необхідно забезпечити прозорість збору та використання даних, надавати користувачам контроль над своєю інформацією та дотримуватись принципів мінімізації даних.

Розробка безпечних та конфіденційних бездротових сенсорних систем моніторингу навколишнього середовища потребує комплексного підходу, що включає застосування криптографічних методів, механізмів автентифікації та управління ключами, систем виявлення вторгнень, заходів фізичної безпеки, а також дотримання правових та етичних норм. Враховуючи обмеження ресурсів сенсорних вузлів, необхідно вибирати ефективні та легковажні рішення, що забезпечують адекватний рівень безпеки без значного зниження продуктивності та часу автономної роботи мережі.

Для подальшого розширення розділу можна детальніше розглянути специфічні атаки на бездротові сенсорні мережі та методи протидії їм, питання безпеки на рівні додатків та керування мережею, а також роль довірених платформ та безпечних елементів (Secure Elements – SE).

Розглянемо докладніше специфічні атаки на бездротові сенсорні мережі та методи протидії їм. Крім згаданих раніше, існують інші поширені атаки. Атака типу «чорна діра» (blackhole attack) полягає в тому, що зловмисник, який контролює один або кілька вузлів, оголошує себе таким, що має найкоротший шлях до цільового вузла і перехоплює весь трафік, який потім може бути відкинутий або модифікований. Протидією можуть бути механізми виявлення аномальної поведінки маршрутизації та використання довірених сусідніх

вузлів. Атака типу «сіра діра» (grayhole attack) є варіантом атаки «чорна діра», коли зловмисник вибірково відкидає або модифікує пакети.

Виявлення даних атак складніше і може вимагати глибшого аналізу трафіку та репутації вузлів. Атака типу «сібїлла» (sybil attack) полягає в тому, що один зловмисник є безліччю різних ідентифікаторів, що може порушити роботу протоколів маршрутизації, агрегації даних і голосування. Протидією можуть бути криптографічні методи аутентифікації та механізми перевірки унікальності ідентифікаторів.

Атаки на рівень MAC (Medium Access Control) можуть включати постійне забивання каналу (jamming) або використання вразливостей протоколу для отримання несанкціонованого доступу. Методи боротьби із забиванням включають використання технік розширення спектру та адаптивну зміну частоти, а захист від уразливостей протоколу потребує своєчасного оновлення програмного забезпечення.

Питання безпеки на рівні програм та управління мережею також мають важливе значення. Безпека програмного забезпечення, що працює на сенсорних вузлах та центральних серверах, повинна забезпечуватись шляхом застосування принципів безпечного програмування, регулярного аудиту коду та своєчасного усунення вразливостей.

Безпека протоколів керування мережею (наприклад, для віддаленого налаштування та оновлення програмного забезпечення) повинна бути ретельно продумана, щоб запобігти несанкціонованому керуванню вузлами. Використання захищених каналів зв'язку та суворої автентифікації адміністраторів є ключовими заходами.

Роль довірених платформ та безпечних елементів (Secure Elements – SE) у забезпеченні безпеки бездротових сенсорних мереж стає все більш значущою. Безпечні елементи є апаратними криптографічними співпроцесорами, які можуть забезпечувати безпечне зберігання ключів, виконання криптографічних операцій і захист від фізичних атак. Інтеграція SE у сенсорні вузли може значно підвищити рівень безпеки, особливо у критично

важливих додатках. Довірені платформи (Trusted Platform Modules - TPM) також можуть використовуватись для забезпечення цілісності завантаження програмного забезпечення та апаратної автентифікації.

Крім того, варто згадати про безпеку агрегованих даних. Навіть якщо окремі вимірювання анонімізовані, агреговані дані, особливо за наявності великої кількості сенсорів та високої частоти збору, можуть містити інформацію, що дозволяє зробити висновки про приватне життя людей або про чутливі екологічні процеси. Необхідно розробляти методи безпечної агрегації даних, які дають змогу отримувати корисну інформацію без розкриття конфіденційних деталей.

Нарешті, освіта та обізнаність користувачів та адміністраторів про проблеми безпеки та конфіденційності є важливим аспектом. Необхідно навчати персонал правильним практикам безпечного налаштування та експлуатації бездротових сенсорних мереж, а також інформувати громадськість про те, які дані збираються, як вони використовуються та які заходи безпеки застосовуються для їх захисту.

Таким чином, забезпечення безпеки та конфіденційності даних у бездротових сенсорних системах моніторингу навколишнього середовища вимагає багаторівневого підходу, що охоплює фізичний, каналний, мережевий, транспортний та прикладний рівні, а також питання управління мережею, використання довірених апаратних засобів та дотримання правових та етичних норм. Постійний розвиток загроз потребує безперервного вдосконалення методів захисту та підвищення обізнаності всіх учасників процесу.

3.4 Перспективи розвитку технології

Майбутнє цієї технології, ймовірно, визначатиметься кількома ключовими тенденціями та інноваціями, що охоплюють апаратне забезпечення, програмне забезпечення, комунікаційні протоколи та сфери застосування. В галузі апаратного забезпечення очікується подальша мініатюризація сенсорних вузлів, зниження їх енергоспоживання та вартості, а також підвищення продуктивності обчислювальних ресурсів та обсягу пам'яті. Розвиток нанотехнологій та нових матеріалів призведе до створення більш чутливих, селективних та стабільних сенсорів для виявлення широкого спектру екологічних параметрів та забруднювачів.

Інтеграція кількох сенсорних функцій в одному чіпі (системи на чіпі - SoC) дозволить створювати компактніші та енергоефективніші мультисенсорні платформи. Розвиток технологій збору енергії (energy harvesting), таких як сонячні елементи нового покоління, п'єзоелектричні та термоелектричні генератори, дозволить створювати повністю автономні сенсорні вузли з необмеженим терміном служби, що особливо важливо для розгортання у віддалених та важкодоступних районах.

В галузі програмного забезпечення очікується розвиток більш інтелектуальних та адаптивних алгоритмів обробки та аналізу даних безпосередньо на сенсорних вузлах (edge computing). Це дозволить знизити обсяг переданих даних, зменшити затримки та підвищити оперативність прийняття рішень. Методи штучного інтелекту (ІІ) та машинного навчання (МО) будуть все ширше застосовуватися для виявлення складних закономірностей в екологічних даних, прогнозування змін, виявлення аномалій та оптимізації роботи сенсорних мереж. Розвиток самоорганізованих та самовідновлюваних мереж дозволить створювати більш стійкі та надійні системи моніторингу, здатні адаптуватися до змін у навколишньому середовищі та відмов окремих вузлів.

У галузі комунікаційних протоколів продовжитья розвиток малопотужних широкодіапазонних мереж (LPWAN), таких як LoRaWAN, NB-IoT та Sigfox, які забезпечують передачу даних на великі відстані за мінімального енергоспоживання. Очікується поява нових, ефективніших та безпечніших протоколів, які враховують специфічні вимоги додатків екологічного моніторингу. Розвиток технологій 5G та майбутніх поколінь мобільного зв'язку також може надати нові можливості для високошвидкісної передачі великих обсягів даних від сенсорних мереж, особливо у міських та приміських районах. Дослідження в галузі підводних бездротових комунікацій (UWCs), включаючи акустичні, оптичні та радіочастотні методи, відкриють нові перспективи моніторингу водних екосистем.

У сфері застосування очікується подальше розширення використання бездротових сенсорних мереж на вирішення кола екологічних завдань. У моніторингу якості повітря розвиватимуться мережі з високою щільністю вузлів для створення детальних карток забруднення в містах та промислових зонах, а також системи персонального моніторингу впливу забруднювачів на здоров'я людини. У моніторингу водних ресурсів удосконалюватимуться системи для безперервного контролю якості води у річках, озерах, водосховищах та океанах, а також для виявлення витоків та забруднень у водопровідних мережах.

У сільському господарстві розвиватимуться системи точного землеробства на основі даних із сенсорних мереж для оптимізації використання води, добрив та пестицидів, а також для моніторингу стану ґрунту та мікроклімату. У моніторингу біорізноманіття та екосистем будуть застосовуватись сенсорні мережі для відстеження популяцій тварин, моніторингу стану лісів та інших природних середовищ. Розвиток систем раннього попередження про стихійні лиха на основі даних із сенсорних мереж дозволить підвищити готовність до екстремальних погодних явищ, повеней, лісових пожеж та інших небезпек.

Важливою тенденцією є інтеграція даних із бездротових сенсорних мереж з даними з інших джерел, таких як супутникові знімки, дані з традиційних станцій моніторингу, соціальні мережі та краудсорсингові дані. Це дозволить створювати більш повні та контекстуалізовані картини стану довкілля та покращити якість аналізу та прогнозування. Розвиток платформ для обміну екологічними даними та стандартизація протоколів та форматів даних сприятимуть ширшому використанню інформації, одержуваної за допомогою бездротових сенсорних мереж.

Нарешті, важливим аспектом розвитку технології є забезпечення безпеки та конфіденційності даних. У майбутньому будуть розроблятися ефективніші та легковажніші методи шифрування, автентифікації та управління ключами, а також механізми захисту від різних кібератак. Особлива увага приділятиметься питанням приватності даних та дотриманню відповідних нормативних вимог.

Таким чином, перспективи розвитку технології бездротових сенсорних систем моніторингу навколишнього середовища є дуже перспективними. Очікується поява більш досконалих сенсорів, інтелектуальних алгоритмів обробки даних, ефективних комунікаційних протоколів та широкого спектру інноваційних додатків, які сприяють покращенню нашого розуміння навколишнього середовища та прийняттю більш обґрунтованих рішень для його захисту та сталого використання.

Для подальшого розширення розділу «Перспективи розвитку технології» можна докладніше розглянути розвиток біосенсорів та хімічних сенсорів нового покоління, інтеграцію з технологіями блокчейн для забезпечення безпеки та прозорості даних, а також роль бездротових сенсорних мереж у концепції «розумних міст» та Інтернету (Internet of Everything - IoE).

Розвиток біосенсорів та хімічних сенсорів нового покоління обіцяє революціонізувати можливості моніторингу довкілля. Біосенсори, що використовують біологічні елементи для виявлення специфічних речовин,

мають високу чутливість і селективність до органічних забруднювачів, патогенів і біомаркерів. Подальші дослідження в галузі біоміметики та синтетичної біології призведуть до створення більш стабільних, надійних та мініатюрних біосенсорів для моніторингу якості води, ґрунту та повітря.

Хімічні сенсори нового покоління, засновані на наноматеріалах (наприклад, графені, вуглецевих нанотрубках, нанодротах оксидів металів) та метаматеріалах, будуть відрізнятися покращеною чутливістю, швидкістю відгуку та селективністю до широкого спектру хімічних речовин, включаючи токсичні гази та важкі метали. Розвиток мультисенсорних масивів та алгоритмів машинного навчання дозволить створювати «електронні носи» та «електронні мови» для комплексного аналізу складу навколишнього середовища.

Інтеграція з технологіями блокчейн може забезпечити новий рівень безпеки, прозорості та цілісності даних, що збираються бездротовими сенсорними мережами. Блокчейн, як розподілений і незмінний реєстр, може використовуватися для безпечного зберігання метаданих сенсорів, записів про калібрування, а також даних моніторингу. Це дозволить відстежувати походження даних, запобігати їх підробці та забезпечувати довіру до інформації, яка використовується для прийняття екологічних рішень. Смарт-контракти на блокчейні можуть автоматизувати процеси управління доступом до даних та обміну інформацією між різними зацікавленими сторонами (наприклад, державними органами, науковими установами, промисловими підприємствами та громадськістю).

Роль бездротових сенсорних мереж у концепції «розумних міст» та Інтернету всього (Internet of Everything - IoE) неухильно зростатиме. У розумних містах бездротові сенсорні мережі стануть ключовою інфраструктурою для моніторингу різних аспектів міського середовища, включаючи якість повітря, рівень шуму, стан дорожнього покриття, керування відходами, енергоспоживання та безпеку. Інтеграція екологічних даних з іншими міськими даними (наприклад, про трафік, споживання енергії,

громадську безпеку) дозволить створювати інтелектуальні системи управління містом, спрямовані на підвищення якості життя та сталий розвиток. У концепції ІоЕ бездротові сенсорні мережі будуть взаємодіяти з багатьма іншими підключеними пристроями і системами, формуючи глобальну мережу обміну інформацією про навколишнє середовище та сприяючи більш ефективному управлінню ресурсами на планеті.

Крім того, слід відзначити розвиток платформ для візуалізації та аналізу даних, які зроблять інформацію, одержувану за допомогою бездротових сенсорних мереж, більш доступною та зрозумілою для широкого кола користувачів. Інтерактивні дашборди, географічні інформаційні системи (ГІС) та інструменти аналітики великих даних дозволять дослідникам, політикам та громадськості отримувати цінні insights про стан навколишнього середовища та відстежувати прогрес у досягненні екологічних цілей.

Нарешті, важливим аспектом є розвиток стандартизації та регулювання у сфері бездротових сенсорних мереж для моніторингу довкілля. Стандартизація протоколів зв'язку, форматів даних та вимог до безпеки сприятиме інтероперабельності пристроїв від різних виробників та полегшить розгортання масштабних систем моніторингу. Чітке регулювання питань використання даних та забезпечення приватності сприятиме громадській довірі до цієї технології.

Таким чином, майбутнє бездротових сенсорних систем моніторингу навколишнього середовища обіцяє бути насиченим інноваціями в галузі сенсорних технологій, штучного інтелекту, комунікацій, безпеки та інтеграції з іншими передовими технологіями. Ці розробки дозволять створити більш ефективні, надійні та масштабні системи для вирішення нагальних екологічних проблем та забезпечення сталого майбутнього.

РОЗДІЛ 4 ПРИКЛАДИ БЕЗДРОТОВИХ СЕНСОРНИХ СИСТЕМ

4.1 Проста система моніторингу температури та вологості на базі ESP8266/ESP32 та Wi-Fi

Це базова, але ефективна система для моніторингу температури та вологості в приміщенні або на невеликій відкритій території з доступом до Wi-Fi. Вона використовує популярний мікроконтролер ESP8266 (або більш потужний ESP32) та датчик DHT22 (або DHT11/AM2302). Дані передаються через Wi-Fi на сервер або в хмарну платформу для подальшого аналізу та візуалізації. Приклад даної системи представлений на рис.4.1.

Компоненти системи:

- Мікроконтролер ESP8266 (наприклад, NodeMCU) або ESP32. Ці мікроконтролери мають вбудований Wi-Fi модуль.
- Датчик DHT22 (AM2302) – для вимірювання температури та вологості. Можна також використовувати BME280 для додаткового вимірювання тиску.
- Джерело живлення USB-адаптер, батарея Li-Po з модулем зарядки (наприклад, TP4056) для автономної роботи.
- З'єднувальні дроти.

Принцип роботи:

- ESP8266/ESP32 зчитує дані з датчика DHT22 через цифровий пін (наприклад, D4).
- Мікроконтролер підключається до локальної мережі Wi-Fi.
- Зібрані дані про температуру та вологість відправляються на обраний сервер або хмарну IoT-платформу (наприклад, ThingSpeak, Blynk, власний сервер з MQTT-брокером) для зберігання, обробки та візуалізації.

–

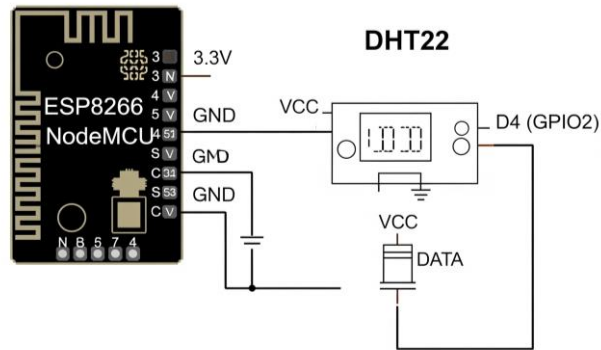


Рисунок 4.1 – Wi-Fi модуль ESP8266/ESP32

Користувач може отримати доступ до цих даних через веб-інтерфейс або мобільний додаток.

4.2 Система моніторингу якості повітря та метеоумов на базі LoRaWAN

Система призначена для розподіленого екологічного моніторингу, зокрема вимірювання якості повітря (рівні частинок PM2.5, PM10, концентрація CO₂, леткі органічні сполуки) та метеорологічних параметрів (температура, вологість, атмосферний тиск). Вона ефективно працює на великих територіях завдяки використанню технології LoRaWAN – протоколу, що забезпечує довготривалу передачу даних на великі відстані при мінімальному енергоспоживанні.

Ця система ідеально підходить для розгортання у сільському господарстві, міських середовищах (парки, житлові зони), а також на територіях промислових підприємств, де контроль за якістю повітря є критично важливим для здоров'я та безпеки населення.

Система складається з вузлів збору даних (End Nodes), що розташовуються в зоні моніторингу, та LoRaWAN шлюзів (Gateways), які приймають сигнали з вузлів і передають інформацію до хмарного сервера або локального центру обробки.

Основні переваги архітектури LoRaWAN:

- Передача на далекі відстані до 10–15 км у відкритій місцевості, 2–5 км у міських умовах;
- Низьке енергоспоживання – вузли можуть працювати роками на одному комплекті батарей;
- Можливість підключення великої кількості пристроїв (до кількох тисяч на один шлюз).

Мікроконтролер (MCU) – STM32 (на базі плати B-L072Z-LRWAN1) або ESP32 з LoRa-модулем, виконує зчитування даних з датчиків, обробку, перетворення у формат передачі та надсилання по LoRa. LoRa-модуль – SX1276/SX1278, один із найпопулярніших модулів для реалізації LoRa. У разі використання STM32 B-L072Z-LRWAN1 LoRa-модуль уже інтегрований. Антена LoRa забезпечує передачу сигналу на великі відстані; бажано використання всеспрямованої антени з посиленням 3–5 dBi.

Датчики BME280 або BMP280 – для вимірювання температури, вологості та тиску (BME280 має всі три параметри, BMP280 – без вологості). PMS5003 або SDS011 – оптичні лазерні сенсори для вимірювання концентрацій твердих частинок PM_{2.5} та PM₁₀, що є важливими показниками пилового забруднення. MQ-135, CCS811 або SGP30 – для аналізу CO₂, летких органічних сполук (VOC) та загальної якості повітря. Ці датчики особливо актуальні для міських або промислових районів.

Джерело живлення – літієва батарея великої ємності LiFePO₄ або Li-SOCl₂, що забезпечують довготривалу автономну роботу (до 1–2 років). Сонячна панель із контролером заряду, що дозволяє підтримувати рівень заряду акумулятора при тривалому використанні в польових умовах.

Передача та обробка даних відбувається за допомогою MCU, яка формує пакети даних, що включають усі показники (PM_{2.5}, CO₂, температура тощо), згідно зі специфікацією LoRaWAN (формат JSON або bincode). Дані надсилаються через LoRa-модуль до базової станції (LoRa Gateway).

Шлюз передає дані далі через Ethernet, Wi-Fi або GSM/4G на хмарну платформу або локальний сервер (наприклад, ThingsBoard, The Things Network, AWS IoT, InfluxDB + Grafana). На сервері виконується зберігання, аналіз і візуалізація інформації в реальному часі.

Переваги даної системи:

- Широка зона покриття з мінімальною кількістю базових станцій;
- Висока енергоефективність завдяки LoRaWAN та сонячному живленню;
- Модульність: легко додаються нові вузли;
- Стійкість до перешкод – LoRa працює у субгігагерцовому діапазоні (433/868 MHz);
- Підтримка стандарту LoRaWAN забезпечує сумісність з відкритими мережами (наприклад, TTN).

Також ця система має додаткові особливості серед яких те, що кожен вузол може бути запрограмований на періодичну передачу (наприклад, 1 раз на 15 хвилин), що дозволяє зменшити навантаження на мережу.

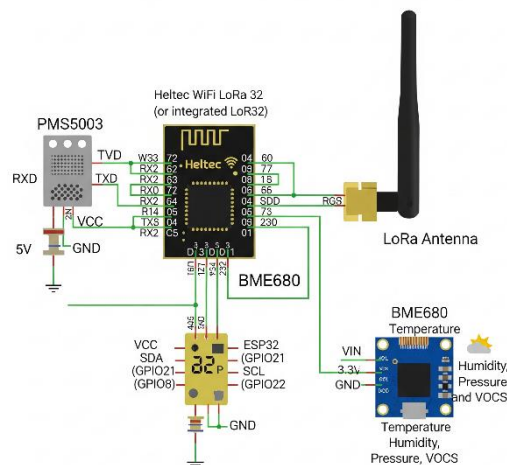


Рисунок 4.2 – Система LoRaWAN

Залежно від умов, можна реалізувати адаптивне управління потужністю передачі, щоб оптимізувати час автономної роботи. При розміщенні в

польових умовах використовуються герметичні корпуси (IP65-IP67), які захищають вузли від дощу, пилу та УФ-випромінення.

4.3 Розподілена система моніторингу рівня води та якості води на базі Zigbee/XBee

Дана система (рис.4.3.) призначена для автоматизованого моніторингу стану водних об'єктів, таких як річки, озера, ставки або канали іригації. Її головною метою є постійне вимірювання таких параметрів, як рівень води, температура, рН та каламутність, що дозволяє своєчасно виявляти зміни у водному середовищі й оперативно реагувати на потенційні загрози.

Система реалізована на основі розподіленої мережі сенсорних вузлів, які з'єднані між собою за допомогою протоколу Zigbee або альтернативного DigiMesh, реалізованого на модулях XBee. Таке рішення дозволяє створити mesh-мережу, яка підтримує багатострижневу маршрутизацію, має властивість самовідновлення в разі втрати вузлів, забезпечує енергоефективність та стійкий зв'язок на середні відстані (до 1–2 км у відкритому середовищі, з можливістю повторення сигналу).

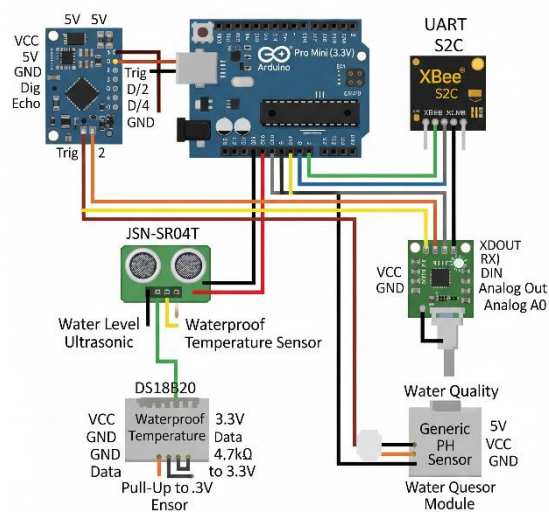


Рисунок 4.3 – Розподілена система моніторингу рівня води та якості води на базі Zigbee/XBee

Сенсорний вузол (End Device або Router) – кожен вузол складається з основних компонентів. Мікроконтролер (MCU) – найчастіше використовується ATmega328P (Arduino Pro Mini) або продуктивніший STM32. MCU відповідає за зчитування даних з датчиків, обробку та передавання через Zigbee.

Zigbee/XBee модуль (XBee S2C), який підтримує стандарт Zigbee або DigiMesh може працювати як крайній пристрій або як маршрутизатор.

Датчики HC-SR04 або JSN-SR04T – ультразвуковий сенсор для вимірювання рівня води (безконтактно, з високою точністю).

DS18B20 – водонепроникний цифровий термометр. Аналоговий рН-метр – вимірювання кислотності води. Датчик каламутності – оцінка забруднення чи вмісту часток у воді.

Джерело живлення пристрою – акумулятор з можливістю зарядки від сонячної панелі, що забезпечує автономність роботи вузлів на тривалий період.

Координатор / Шлюз (Coordinator / Gateway) – центральна ланка мережі, яка приймає дані з сенсорних вузлів, опрацьовує їх та надсилає на сервер або хмару. Основні компоненти шлюзу – Zigbee/XBee модуль в режимі координатора, підключений до комп'ютера або мікроконтролера (наприклад, через USB або UART).

Мікроконтролер або мінікомп'ютер (ESP32 або Raspberry Pi) приймає дані з Zigbee, виконує буферизацію, локальну обробку, а також відправлення у мережу.

Модуль зв'язку з Інтернетом – Wi-Fi, Ethernet, або GSM/GPRS модуль для віддаленого надсилання даних на сервер або хмарну платформу (наприклад, AWS, ThingsBoard, InfluxDB + Grafana тощо).

Принцип роботи системи полягає у тому, що сенсорний вузол зчитує параметри води з датчиків. MCU формує пакети з даними та передає їх через XBee до координатора. Координатор приймає ці дані, обробляє (при

необхідності) та відправляє далі в Інтернет. На сервері дані зберігаються, візуалізуються або аналізуються у режимі реального часу.

До переваг системи можна віднести:

- Гнучку топологію (mesh-з'єднання).
- Автономну роботу сенсорів.
- Можливість розширення (додавання нових вузлів без реконфігурації всієї системи).
- Надійність передачі даних навіть при виході з ладу окремих елементів.
- Модульність та масштабованість.

ВИСНОВОК

Висновок даної роботи підбиває підсумки дослідження, під час якого було розглянуто ключові аспекти, пов'язані з технологіями бездротових сенсорних систем, їх застосуванням у сфері моніторингу навколишнього середовища, а також перевагами та обмеженнями, які вони несуть із собою.

Сучасні технології бездротової сенсорної системи є значним кроком вперед у галузі збору та аналізу даних про навколишнє середовище. Ці системи, засновані на використанні різних сенсорів, здатні в режимі реального часу відстежувати зміни в атмосферних умовах, рівень забруднення, температуру, вологість та інші важливі параметри. Бездротові технології, такі як Zigbee, LoRaWAN, NB-IoT та інші, забезпечують надійну передачу даних на великі відстані з мінімальним споживанням енергії, що робить їх ідеальними для використання у віддалених та важкодоступних районах.

Одним із основних застосувань бездротових сенсорних систем є моніторинг навколишнього середовища. Ці системи дозволяють збирати дані про стан екосистем, що дає можливість приймати обґрунтовані рішення на рівні державного управління, бізнесу та приватних ініціатив. Наприклад, за допомогою бездротових сенсорів можна відстежувати рівень забруднення повітря у містах, що є важливим аспектом для покращення якості життя населення та захисту здоров'я людей. Також системи моніторингу можуть використовуватися для контролю стану водойм, лісів та сільськогосподарських угідь, що дозволяє своєчасно реагувати на екологічні загрози та запобігати катастрофічним наслідкам.

Переваги бездротових сенсорних систем для моніторингу навколишнього середовища є очевидними. По-перше, вони дозволяють отримати доступ до даних реального часу, що значно прискорює процес прийняття рішень. По-друге, такі системи можуть бути встановлені у важкодоступних місцях, де традиційні методи моніторингу утруднені чи неможливі. По-третє, бездротові сенсори зазвичай мають низьке

енергоспоживання, що дозволяє їм працювати тривалий час без необхідності заміни батарей або підключення до електромережі. Це особливо важливо для систем, що працюють у віддалених регіонах.

Тим не менш, бездротові сенсорні системи також стикаються з певними обмеженнями. Одним з основних недоліків є потенційна вразливість до зовнішніх впливів, таких як перешкоди передачі даних або фізичні пошкодження сенсорів. Крім того, проблеми з безпекою даних та конфіденційністю також вимагають уваги, оскільки інформація, що передається бездротовими каналами, може бути перехоплена або схильна до маніпуляцій. Також варто зазначити, що вартість розгортання та обслуговування таких систем може бути досить високою, що може обмежувати їхнє впровадження у деяких регіонах чи організаціях.

Бездротові сенсорні системи для моніторингу навколишнього середовища є потужним інструментом, здатним значно покращити якість збору та аналізу даних про екосистеми. Їхнє застосування відкриває нові горизонти для наукових досліджень, державного управління та бізнесу, дозволяючи більш ефективно реагувати на зміни в навколишньому середовищі. Незважаючи на існуючі обмеження, технології продовжують розвиватися, і з кожним роком стають дедалі доступнішими та надійнішими. Майбутнє бездротових сенсорних систем виглядає багатообіцяюче, і їх інтеграція у різні сфери життя сприятиме створенню стійкішого та безпечнішого світу для майбутніх поколінь.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Castell N., Dauge F. R., Schneider P., Vogt M., Lerner U. Can Commercial Low-Cost Sensor Platforms Contribute to Air Quality Monitoring and Exposure Estimates? // *Environment International*. 2020. Vol. 134. Article 105251. URL: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.105251> (дата звернення: 30.01.2025).
2. Snyder E. G. et al. The Changing Paradigm of Air Pollution Monitoring // *Environmental Science & Technology*. 2013. Vol. 47, № 20. P. 11369–11377. URL: <https://doi.org/10.1021/es4022602> (дата звернення: 30.01.2025).
3. Sadler M. E., Xu L. Low-Cost Sensor Network for Real-Time Urban Air Quality Monitoring // *Sensors*. 2019. Vol. 19, № 2. Article 328. URL:: <https://doi.org/10.3390/s19020328> (дата звернення: 07.02.2025).
4. Schauer J. J., Turner J. R., Cahill T. A. Spatial Variability and Sources of Fine Particulate Matter in St. Louis // *Environmental Science & Technology*. – 2006. Vol. 40, № 3. P. 697–703. URL:: <https://doi.org/10.1021/es0511006>, (дата звернення: 07.02.2025).
5. Маг В., Zhou Z., Thiele L. W-Air: Enabling Personal Air Pollution Monitoring on Wearables // *Proceedings of the ACM on Interactive, Mobile, Wearable and Ubiquitous Technologies*. 2018. Vol. 2, № 1. Article 20. URL: <https://doi.org/10.1145/3191745>, (дата звернення: 15.02.2025).
6. Gao Y., Lin C., Yuan X. et al. Low-Cost Sensors for Air Quality Monitoring: Data Validation and Calibration // *IEEE Sensors Journal*. 2021. Vol. 21, № 6. – P. 7985–7994. – URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9371704>, (дата звернення: 17.02.2025).
7. Chakraborty S., Balasubramanian R. Air Quality Monitoring and Forecasting Using Machine Learning // *Environmental Modelling & Software*. 2021. Vol. 146. Article 105204. URL: <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2021.105204>, (дата звернення: 23.02.2025).

8. De Vito S. et al. On Field Calibration of Air Quality Sensors Using Artificial Neural Networks // *Sensors and Actuators B: Chemical*. – 2009. – Vol. 143, № 1. – P. 182–191. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.snb.2009.09.044>, (дата звернення: 23.02.2025).
9. Mead M. I. et al. The Use of Electrochemical Sensors for Monitoring Urban Air Quality in Low-Cost, High-Density Networks // *Atmospheric Environment*. 2013. Vol. 70. P. 186–203. URL: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.11.060>, (дата звернення: 25.02.2025).
10. Spinnelle L., Gerboles M., Kok G., Persijn S., Sauerwald T. Review of Portable and Low-Cost Sensors for the Ambient Air Monitoring of Benzene and Other Volatile Organic Compounds // *Sensors*. 2017. Vol. 17, № 7. Article 1520. URL: <https://doi.org/10.3390/s17071520>, (дата звернення: 27.02.2025).
11. Lewis A. C., Edwards P. M. Validate and Calibrate Sensors for Real-World Use // *Nature*. 2016. Vol. 535. P. 29–31. URL: <https://doi.org/10.1038/535029a>, (дата звернення: 01.03.2025).
12. Clements A. L. et al. Low-Cost Air Quality Monitoring Tools: From Research to Practice // *Sensors*. 2017. Vol. 17, № 11. Article 2478. URL: <https://doi.org/10.3390/s17112478>, (дата звернення: 03.03.2025).
13. Dutta P., Grimmer M., Arora A. Design of a Wireless Sensor Network Platform for Detecting Rare, Random, and Ephemeral Events // *ACM Transactions on Embedded Computing Systems*. 2006. Vol. 5, № 2. P. 543–576. URL: <https://doi.org/10.1145/1147680.1147689>, (дата звернення: 03.03.2025).
14. Khedo K. K., Perseedoss R., Mungur A. A Wireless Sensor Network Air Pollution Monitoring System // *International Journal of Wireless & Mobile Networks (IJWMN)*. 2010. Vol. 2, № 2. P. 31–45. URL: <https://doi.org/10.5121/ijwmn.2010.2203>, (дата звернення: 05.03.2025).
15. Suriano D., Di Franco C., Miccoli B. Urban Noise Pollution Monitoring with Low-Cost Sensor Networks // *Applied Acoustics*. 2022. Vol. 181. Article

108137. URL: <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2021.108137>, (дата звернення: 05.03.2025).
16. Gulliver J., Morawska L. Using Remote Sensing and In Situ Monitoring to Map Urban Air Pollution // *Science of The Total Environment*. – 2021. – Vol. 773. Article 145620. URL: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145620>, (дата звернення: 05.03.2025).
17. Esposito E., De Vito S., Salvato M. Mapping and Predicting PM Concentrations Using WSN and AI // *Environmental Pollution*. 2020. Vol. 265. Article 114683. URL: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114683>, (дата звернення: 07.03.2025).
18. Wang Y., Li J., Jing H. Wireless Sensor Network for Forest Fire Detection // *Procedia Engineering*. 2012. Vol. 45. P. 752–757. URL: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.08.227>, (дата звернення: 30.05.2025).
19. Lin H., Rivano H., Le Mouél F. A Survey of Smart Parking Solutions // *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 2017. Vol. 18, № 12. P. 3229–3253. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7932896>, (дата звернення: 13.03.2025).
20. Bhattacharyya D., Kim T.-H., Pal S. A Comparative Study of Wireless Sensor Networks and Their Application in Environmental Monitoring // *Sensors*. 2021. Vol. 21, № 3. Article 1020. URL: <https://doi.org/10.3390/s21031020>, (дата звернення: 13.03.2025).
21. Al-Karaki J. N., Kamal A. E. Routing Techniques in Wireless Sensor Networks: A Survey // *IEEE Wireless Communications*. 2004. Vol. 11, № 6. P. 6–28. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1368892>, (дата звернення: 13.03.2025).
22. Manjeshwar A., Agrawal D. P. Data Compression Techniques for Wireless Sensor Networks: A Survey // *Ad Hoc Networks*. 2005. Vol. 3, № 4. P. 695–723. URL: <https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2005.01.002>, (дата звернення: 13.03.2025).

23. Raghunathan V., Sundararaman K., Vrudhula S., Srivastava M. B. Energy-Aware Wireless Microsensor Networks // IEEE Signal Processing Magazine. 2002. Vol. 19, № 2. P. 40–50. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/993952>, (дата звернення: 14.03.2025).
24. Schnoor J. L. Environmental Modeling: Fate and Transport of Pollutants in Water, Air, and Soil. John Wiley & Sons, 1996. 682 p. URL: <https://www.wiley.com/en-us/Environmental+Modeling%3A+Fate+and+Transport+of+Pollutants+in+Water%2C+Air%2C+and+Soil-p-9780471124374>, (дата звернення: 20.03.2025).
25. Jensen J. R. Micrometeorology. Springer? 2005/ 336 p/ URL^ [https://www.springer.com/gp/book/9781402033640? \(lfnf pdthytyyz^](https://www.springer.com/gp/book/9781402033640? (lfnf pdthytyyz^) 20/03/2025)/
26. Snyder E. G., Watkins T. H. et al. Low-Cost Sensor Devices for Monitoring Urban Air Pollution // Environmental Science & Technology. 2013. Vol. 47, № 20. P. 11823–11832. URL: <https://doi.org/10.1021/es403192q> , (дата звернення: 20.03.2025).
27. Buyya R., Dastjerdi A. V. Internet of Things: Principles and Paradigms. – Elsevier, 2016. 378 p. URL: <https://www.sciencedirect.com/book/9780128053959/internet-of-things>, (дата звернення: 20.03.2025).
28. Gislason D. Zigbee Wireless Networking. Newnes, 2008. 360 p. URL: <https://www.sciencedirect.com/book/9780750685973/zigbee-wireless-networking>, (дата звернення: 27.03.2025).
29. Maroulis D., Triantafyllopoulos G. Air Quality Monitoring and Assessment. Springer? 2017/ 285 p/ URL^ <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-319-53726-9> (дата звернення: 27.03.2025)
30. Crocker M. J. Handbook of Noise and Vibration Control. Wiley, 2007. 1600 p. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9780470172567>, (дата звернення: 27.03.2025).

31. Bhatnagar A. Environmental Noise Pollution. CRC Press, 2010. 290 p. URL: <https://www.routledge.com/Environmental-Noise-Pollution/Bhatnagar/p/book/9781439805278>, (дата звернення: 10.04.2025).
32. Crocker M. J., Arenas J. P. Environmental Noise Barriers: A Review // Applied Acoustics. 2010. Vol. 71, № 2. P. 71–82. URL: <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2009.09.003>, (дата звернення: 10.04.2025).
33. EPA. Water Quality Standards Handbook. U.S. Environmental Protection Agency, 2017. URL: <https://www.epa.gov/wqs-tech/water-quality-standards-handbook>, (дата звернення: 10.04.2025).
34. ISO 5667-1:2006. Water Quality Sampling Part 1: Guidance on the Design of Sampling Programmes and Sampling Techniques. – International Organization for Standardization. URL: <https://www.iso.org/standard/36629.html>, (дата звернення: 10.04.2025).
35. Gutiérrez J., Villa-Medina J. F., Nieto-Garibay A., Porta-Gándara M. A. Automated Irrigation System Using a Wireless Sensor Network and GPRS Module // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2014. Vol. 63, № 1. P. 166–176. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6603078>, (дата звернення: 10.04.2025).
36. Akyildiz I. F., Vuran M. C. Wireless Sensor Networks. Wiley, 2010. 520 p. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9780470515180>, (дата звернення: 10.04.2025).
37. Sundmaeker H., Guillemin P., Friess P., Woelfflé S. Vision and Challenges for Realising the Internet of Things. European Commission, 2010. URL: <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/469b72fb-b25f-443c-98c4-1747f703b841>, (дата звернення: 10.05.2025).
38. Perera C., Zaslavsky A., Christen P., Georgakopoulos D. Context Aware Computing for the Internet of Things: A Survey // IEEE Communications Surveys & Tutorials. 2014. Vol. 16, № 1. P. 414–454. URL:

- <https://ieeexplore.ieee.org/document/6553676>, (дата звернення: 14.04.2025).
39. Zhao F., Guibas L. Wireless Sensor Networks: An Overview // IEEE Wireless Communications. 2004. Vol. 11, № 6. P. 28–34. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1368893>, (дата звернення: 14.04.2025).
40. Karl H., Willig A. Protocols and Architectures for Wireless Sensor Networks. John Wiley & Sons, 2005. 537 p. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/0470095121>, (дата звернення: 14.04.2025).
41. Lavric A., Popescu G. H. Low-Power Wide-Area Networks (LPWANs) for IoT: A Survey // Journal of Telecommunications and Information Technology. 2017. № 4. P. 5–34. URL: <https://www.itl.waw.pl/czasopisma/JTIT/2017/4/5.pdf>, (дата звернення: 14.04.2025).
42. Gubbi J., Buyya R., Marusic S., Palaniswami M. Internet of Things (IoT): A Vision, Architectural Elements, and Future Directions // Future Generation Computer Systems. 2013. Vol. 29, № 7. P. 1645–1660. URL: <https://doi.org/10.1016/j.future.2013.01.010>, (дата звернення: 18.04.2025).
43. Boukerche A., Oliveira H. A. B. F., Nakamura E. F., Loureiro A. A. F. A Survey on Data Processing in Wireless Sensor Networks // Computer Networks. 2011. Vol. 55, № 3. P. 789–813. URL: <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2010.10.001>, (дата звернення: 30.05.2025).
44. Sohraby K., Minoli D., Znati T. Wireless Sensor Networks: Technology, Protocols, and Applications. John Wiley & Sons, 2007. 328 p. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/047011276X>, (дата звернення: 18.04.2025).
45. Hillar G. C. Building Internet of Things with Python. Packt Publishing, 2016. – 509 p. URL: <https://www.packtpub.com/product/building-internet-of-things-with-python/9781785285981>, (дата звернення: 18.04.2025).

46. Kleppmann M. *Designing Data-Intensive Applications*. O'Reilly Media, 2017. 616 p. URL: <https://dataintensive.net>, (дата звернення: 05.05.2025).
47. Bartram J., Ballance R. *Water Quality Monitoring: A Practical Guide to the Design and Implementation of Freshwater Quality Studies and Monitoring Programmes*. E&FN Spon, 1996. 383 p. URL: <https://www.who.int/publications/i/item/9241544135>, (дата звернення: 30.05.2025).
48. Castell N., Schneider P., Grossberndt S. *Mobile Technologies and Low-Cost Sensors for Air Quality Monitoring // Atmospheric Environment*. 2017. Vol. 151. P. 221–242. URL: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.12.005>, (дата звернення: 05.05.2025).
49. Snyder E. G., Watkins T. H., Benke A. A. et al. *The Changing Paradigm of Air Pollution Monitoring // Environmental Science & Technology*. 2013. Vol. 47, № 20. P. 11369–11377. URL: <https://doi.org/10.1021/es4022602>, (дата звернення: 05.05.2025).
50. Ye W., Heidemann J., Estrin D. *Medium Access Control with Coordinated Adaptive Sleeping for Wireless Sensor Networks // IEEE/ACM Transactions on Networking*. 2004. Vol. 12, № 3. P. 493–506. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1311221>, (дата звернення: 05.05.2025).
51. Tripathy A. K., Misra S. *Green Wireless Sensor Networks: Energy Harvesting, Power Management, and Cooperative Communication*. CRC Press, 2017. 314 p. URL: <https://www.crcpress.com/Green-Wireless-Sensor-Networks/Tripathy-Misra/p/book/9781138749896>, (дата звернення: 05.05.2025).
52. Ilyas M., Mahgoub I. *Handbook of Sensor Networks: Compact Wireless and Wired Sensing Systems*. CRC Press, 2005. 624 p. URL: <https://www.crcpress.com/Handbook-of-Sensor-Networks/Ilyas-Mahgoub/p/book/9780849328328>, (дата звернення: 05.05.2025).

53. Jensen J. R. Remote Sensing of the Environment: An Earth Resource Perspective. Pearson, 2007. 592 p. URL: <https://www.pearson.com/store/p/remote-sensing-of-the-environment/P100000713234>, (дата звернення: 20.05.2025).
54. Cook D., Das S. Smart Environments: Technology, Protocols and Applications. John Wiley & Sons, 2004. 232 p. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/047168659X>, (дата звернення: 20.05.2025).
55. Rajkumar B., Dastjerdi A. V. Internet of Things: Principles and Paradigms. Elsevier, 2016. 378 p. URL: <https://www.sciencedirect.com/book/9780128053959/internet-of-things>, (дата звернення: 30.05.2025).
56. Atzori L., Iera A., Morabito G. The Internet of Things: A Survey // Computer Networks. 2010. Vol. 54, № 15. P. 2787–2805. URL: <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2010.05.010>, (дата звернення: 30.05.2025).
57. Akyildiz I. F., Su W., Sankarasubramaniam Y., Cayirci E. A Survey on Sensor Networks // IEEE Communications Magazine. 2002. Vol. 40, № 8. P. 102–114. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1024422>, (дата звернення: 27.05.2025).
58. Perera C., Liu C. H., Jayawardena S. The Emerging Internet of Things Marketplace from an Industrial Perspective: A Survey // IEEE Transactions on Emerging Topics in Computing. 2015. Vol. 3, № 4. P. 585–598. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7087339> (дата звернення: 30.05.2025).