

<https://doi.org/10.31891/2219-9365-2024-78-2>

УДК 621.317

ОСАДЧУК Олександр

Вінницький національний технічний університет

<https://orcid.org/0000-0001-6662-9141>

e-mail: osadchuk.av69@gmail.com

ОСАДЧУК Ярослав

Вінницький національний технічний університет

<https://orcid.org/0000-0002-5472-0797>

e-mail: osadchuk.av69@gmail.com

ДОВГУН Вадим

Вінницький національний технічний університет

e-mail: midavmidav2000@gmail.com

ДОСЯГНЕННЯ ТА ВИКЛИКИ ХМАРНИХ ТЕХНОЛОГІЙ МОНІТОРИНГУ ЯКОСТІ ПОВІТРЯ

У роботі розглянуто останні досягнення в галузі хмарних та IoT-систем моніторингу якості повітря, наголошуючи на інтеграції недорогих сенсорних технологій, штучного інтелекту та машинного навчання для розширеного аналізу та прогнозування даних. Проаналізовано різні підходи до моніторингу якості повітря, включаючи використання протоколів стільникового зв'язку, Wi-Fi та LPWA для передачі даних, а також досліджуються переваги та проблеми розгортання масштабованих та економічних рішень у міських та віддалених районах. Представлено всебічний огляд поточних тенденцій та проблем у галузі моніторингу якості повітря, а також дано уявлення про майбутні напрямки досліджень та розробок у цій галузі.

Ключові слова: моніторинг якості повітря, хмарні обчислення, штучний інтелект, інтернет речей, бездротова сенсорна мережа.

OSADCHUK Oleksandr, OSADCHUK Iaroslav, DOVHUN Vadim

Vinnitsia National Technical University

ACHIEVEMENTS AND CHALLENGES OF CLOUD TECHNOLOGIES FOR AIR QUALITY MONITORING

Air pollution is a critical environmental problem affecting both developed and developing countries. It has far-reaching consequences, contributing to global warming and having a direct adverse effect on human health. The need for clean air is not only an environmental problem, but also a public health imperative. As the level of air pollution continues to increase, especially in urban areas with high population density, it becomes very important to accurately monitor and mitigate its effects.

Governments and regulatory bodies around the world play an important role in improving air quality. Effective measurement of the impact of policies and measures on air pollution requires accurate and timely data on the spatial and temporal distribution of air pollutants. Traditionally, this requirement was met by deploying a network of air quality monitoring stations. Although these stations provide highly accurate data, their high cost and operational complexity limit their number and, therefore, the degree of detail they can collect.

The paper reviews the latest achievements in the field of cloud and IoT air quality monitoring systems, highlighting the integration of inexpensive sensor technologies, artificial intelligence, and machine learning for advanced data analysis and prediction. Various approaches to air quality monitoring are analyzed, including the use of cellular, Wi-Fi, and LPWA protocols for data transmission, and the advantages and challenges of deploying scalable and cost-effective solutions in urban and remote areas are explored. A comprehensive overview of current trends and challenges in the field of air quality monitoring is presented, along with insights into future research and development directions in this area.

Keywords: air quality monitoring, cloud computing, artificial intelligence, internet of things, wireless sensor network.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ У ЗАГАЛЬНОМУ ВИГЛЯДІ ТА ЇЇ ЗВ'ЯЗОК ІЗ ВАЖЛИВИМИ НАУКОВИМИ ЧИ ПРАКТИЧНИМИ ЗАВДАННЯМИ

Забруднення повітря є критичною екологічною проблемою, яка торкається як розвинених, так і країн, що розвиваються. Воно має далекосяжні наслідки, сприяючи глобальному потеплінню та надаючи прямий несприятливий вплив на здоров'я людини. Потреба в чистому повітрі — не лише екологічна проблема, а й імператив громадської охорони здоров'я. Оскільки рівень забруднення повітря продовжує зростати, особливо у міських районах із високою щільністю населення, стає дуже важливо точно відстежувати та пом'якшувати його наслідки [1, 2, 3].

Уряди та регулюючі органи у всьому світі відіграють важливу роль у покращенні якості повітря. Для ефективного вимірювання впливу політики та заходів на забруднення повітря необхідні точні та своєчасні дані про просторовий та тимчасовий розподіл забрудників повітря. Традиційно ця вимога задовольнялася за рахунок розгортання мережі станцій моніторингу якості повітря. Хоча ці станції надають високоточні дані, їхня висока вартість та складність експлуатації обмежують їх кількість і, отже, ступінь деталізації даних, які вони можуть збирати [1].

У відповідь на ці проблеми хмарні системи моніторингу повітря стали перспективною альтернативою. Ці системи використовують технології хмарних обчислень для підвищення ефективності та охоплення зусиль моніторингу якості повітря. Було розглянуто різні підходи до впровадження хмарних систем моніторингу повітря з упором на їхній потенціал щодо надання повних даних про забруднення повітря в режимі реального часу. Такі системи могли б значно покращити здатність політиків та посадових осіб громадської охорони здоров'я приймати обґрунтовані рішення та вживати своєчасних заходів для захисту якості повітря.

Розвиток моніторингу якості повітря наштовхнувся на серйозну перешкоду: величезні обсяги даних, що генеруються сенсорними мережами. Ця проблема "великих даних" вимагає значної обчислювальної потужності та ємності зберігання, з якими традиційні обчислювальні інфраструктури важко справляються. Поширення датчиків, кожен з яких постійно генерує дані, робить швидку обробку та аналіз інформації про якість повітря все більш складними та ресурсомісткими [3].

Традиційні станції моніторингу якості повітря, хоч і точні, характеризуються великими фізичними розмірами та суттєвими грошовими затратами, пов'язаними з їх установкою та обслуговуванням. Ці чинники серйозно обмежують можливість розгортання щільної мережі станцій, особливо у міських районах, де простір обмежений, а потреба у докладних даних про якість повітря найгостріша. Більш того, традиційний підхід до моніторингу якості повітря включає автономні та трудомісткі процедури аналізу даних. У результаті отримані дані не надаються в режимі реального часу, що значно знижує їхню корисність для своєчасного прийняття рішень та оповіщення громадськості.

З іншої сторони, хмарні обчислення пропонують переконливе вирішення цих проблем. Використовуючи хмару, системи моніторингу якості повітря можуть обробляти і зберігати великі обсяги даних віддалено, усуваючи необхідність великих обчислювальних ресурсів. Цей підхід не тільки полегшує аналіз та розповсюдження даних про якість повітря в режимі реального часу, але також дозволяє економічно ефективно масштабувати моніторинг. Завдяки хмарним системам стає можливим розгортання більшої мережі датчиків навіть у густонаселених міських районах без надмірних витрат та логістичних складнощів, пов'язаних із традиційними станціями моніторингу.

Крім того, хмарна архітектура підтримує розширені алгоритми аналізу даних та машинного навчання, розширюючи прогностичні можливості систем моніторингу якості повітря. Це дозволяє не лише відстежувати рівні забруднення в режимі реального часу, а й прогнозувати тенденції якості повітря, надаючи цінну інформацію політикам, дослідникам та громадськості.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Дослідження 2024 року, проведене Абдулом Самадом та співавторами, представляє інноваційну хмарну платформу моніторингу якості повітря, яка використовує недорогі датчики та технологію Raspberry Pi [3]. Це дослідження усуває значні економічні та технологічні перешкоди у моніторингу якості повітря шляхом впровадження системи, яка є економічно ефективною та здатна обробляти дані у режимі реального часу.

Примітним аспектом цієї платформи є її залежність від стільникового зв'язку передачі даних. Такий підхід забезпечує широке охоплення та високу швидкість передачі даних, що вкрай важливо для моніторингу в реальному часі. Однак це також призводить до збільшення експлуатаційних витрат та вищого енергоспоживання, що створює проблему для стійкості та економічної ефективності системи.

Для боротьби з проблемами точності показань датчиків, спричиненими вологістю повітря, дослідники інтегрували в конструкцію вдосконалені осушувачі повітря. Хоча це ефективний спосіб пом'якшення впливу вологості, він одночасно підвищує вимоги до живлення системи, що може ускладнити досягнення повністю автономної роботи вузлів моніторингу. Вузли моніторингу спроектовані так, щоб бути стаціонарними та мати постійне електроживлення, що усуває проблеми із терміном служби батареї та забезпечує безперервну роботу. Однак такий вибір конструкції обмежує гнучкість та адаптованість системи до різних середовищ, оскільки її неможливо легко перемістити або налаштувати [3].

Прагнення дослідників знизити фінансові бар'єри для широкомасштабного моніторингу якості повітря очевидно у його підході до проектування системи. Вибираючи недорогі компоненти, дослідницька група демонструє, що можна покращити просторову та часову роздільну здатність даних про якість повітря за рахунок розгортання щільної мережі датчиків. Ця стратегія спрямована на те, щоб компенсувати потенційне погіршення якості окремих датчиків за рахунок збільшення кількості точок збору даних [4, 5].

Мінімальні вимоги до обслуговування датчиків ще більше підвищують привабливість системи, полегшуючи масштабованість мережі. Можливість вимірювати якість повітря кожен секунду значно збагачує набір даних, забезпечуючи уявлення динаміку якості повітря практично в реальному часі. Однак проєкт зіткнувся з проблемами, такими як електромагнітні перешкоди (EMI) від модему, що спотворили показання газових датчиків. Ця проблема підкреслює складність інтеграції електронних компонентів в обмеженому просторі, наголошуючи на необхідності ретельного проектування, щоб уникнути перешкод [6, 3].

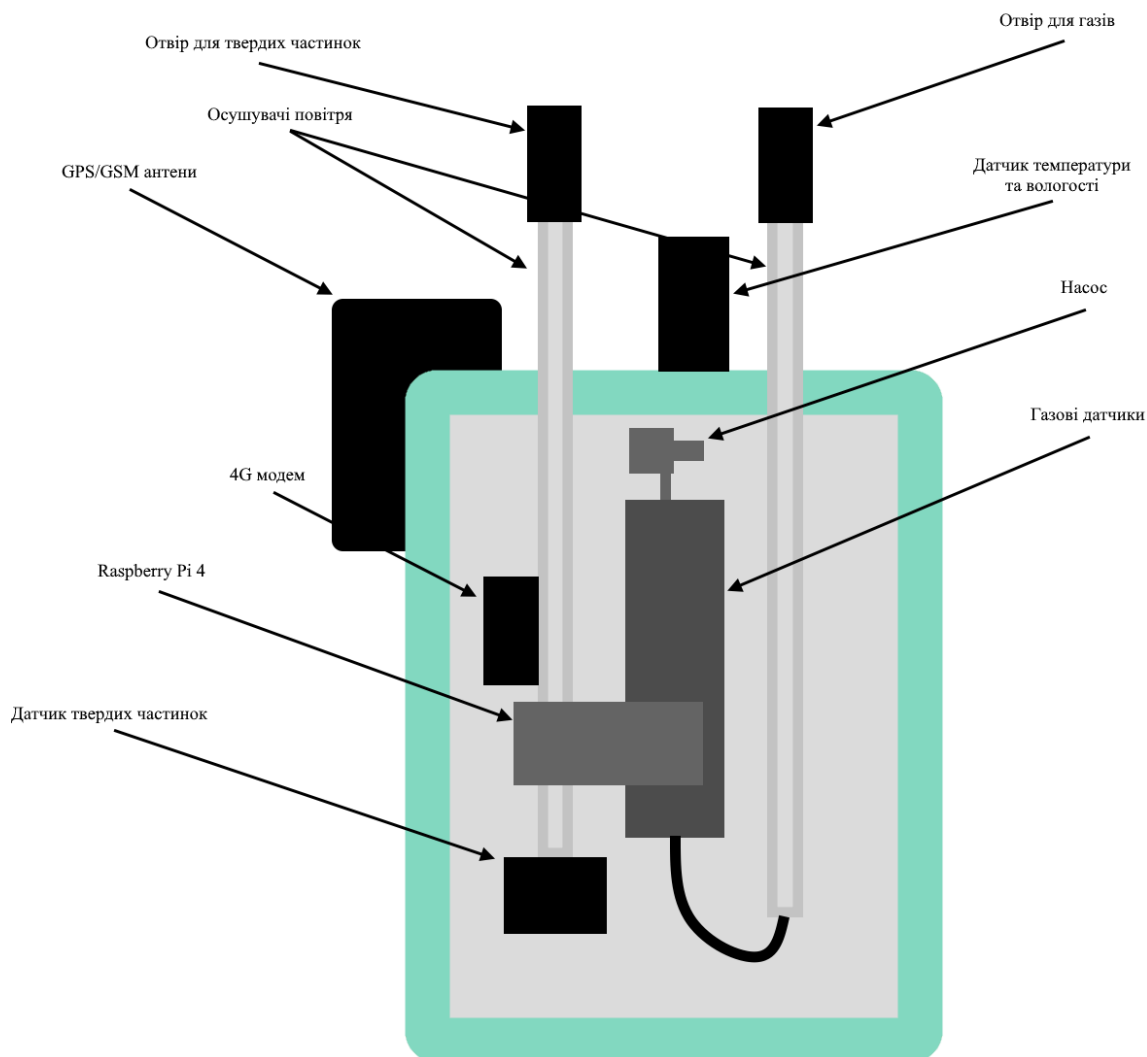


Рис. 1. Структура сенсорного вузла [3]

Грунтуючись на вивченні хмарних систем моніторингу якості повітря, дослідження, проведене Патрісією Арройо та співавторами, представляє нову інтеграцію бездротової сенсорної мережі (WSN) з хмарними обчисленнями [7]. У цьому дослідженні представлений унікальний підхід, який використовує протокол ZigBee для зв'язку всередині мережі, що наголошує на прагненні компанії розробити недороге рішення для моніторингу якості повітря.

Використання протоколу ZigBee є ключовим аспектом цього дослідження, оскільки він забезпечує ефективний зв'язок із низьким енергоспоживанням між сенсорними вузлами. Цей вибір наголошує на акценті проекту на мінімізації експлуатаційних витрат та енергоспоживання, що відповідає головній меті забезпечення стійкості та доступності зусиль з моніторингу навколишнього середовища. Однак використання ZigBee також призводить до виникнення питань, що стосуються діапазону дії та обмежень пропускну здатності протоколу, які можуть вплинути на масштабованість системи та можливості передачі даних.

Значним досягненням, представленим у цьому дослідженні є застосування штучного інтелекту (ШІ) для аналізу даних. Завдяки інтеграції алгоритмів штучного інтелекту система отримує можливість обробляти та інтерпретувати величезні обсяги даних, зібраних датчиками, що підвищує точність та корисність зусиль з моніторингу. Таке впровадження штучного інтелекту як розширює аналітичні можливості системи, так і відкриває можливості прогнозу аналітики, пропонуючи розуміння майбутніх тенденцій якості повітря з урахуванням історичних даних.

Охоплюючи концепцію бездротової сенсорної мережі (WSN), це дослідження розглядає мобільність сенсорних вузлів - особливість, яка відрізняється від стаціонарних вузлів, розглянутих в інших дослідженнях. Мобільність цих датчиків привносить динамічний компонент до моніторингу якості повітря, дозволяючи охопити ширші території та гнучко налаштувати місця моніторингу залежно від конкретних потреб чи подій. Однак ця мобільність також створює проблеми, у тому числі складність забезпечення безперервного збору даних.

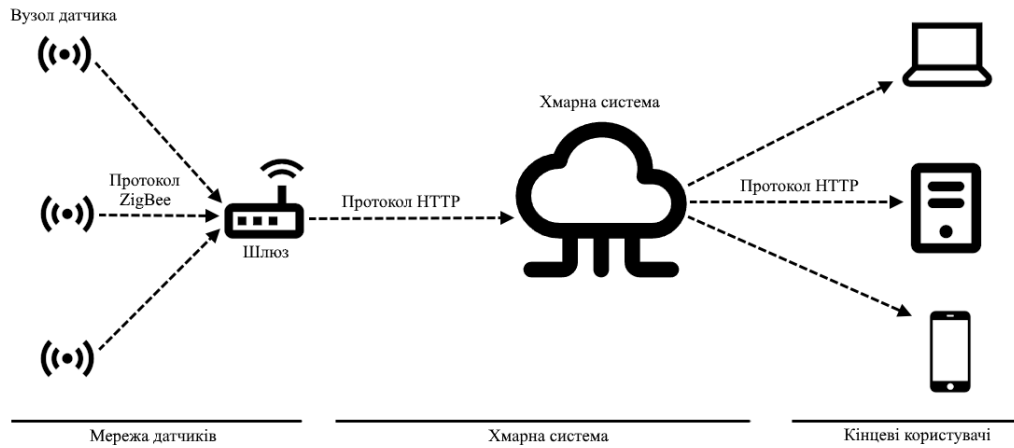


Рис. 2. Схема хмарної мережі датчиків [7]

Щоб вирішити проблему енергоспоживання, у дослідженні використовуються сонячні панелі як основне джерело живлення сенсорних вузлів. Цей підхід не лише відповідає екологічним цілям проекту, а й підвищує автономність сенсорних вузлів. Проте залежність від сонячної енергії призводить до нестабільності експлуатаційних можливостей системи залежно від погодних умов та наявності сонячного світла.

У дослідженні, проведеному Енда Крістіані та співавторами, пропонується складна архітектура хмарних обчислень для моніторингу якості повітря, яка використовує інтеграцію OpenStack та Kubernetes для надійного та ефективного управління системою [5]. Це дослідження є значним прогресом у цій галузі за рахунок розширення можливостей традиційних хмарних обчислень за допомогою концепції периферійних обчислень (edge computing) для вирішення конкретних завдань, пов'язаних з аналізом даних у реальному часі у додатках моніторингу якості повітря.

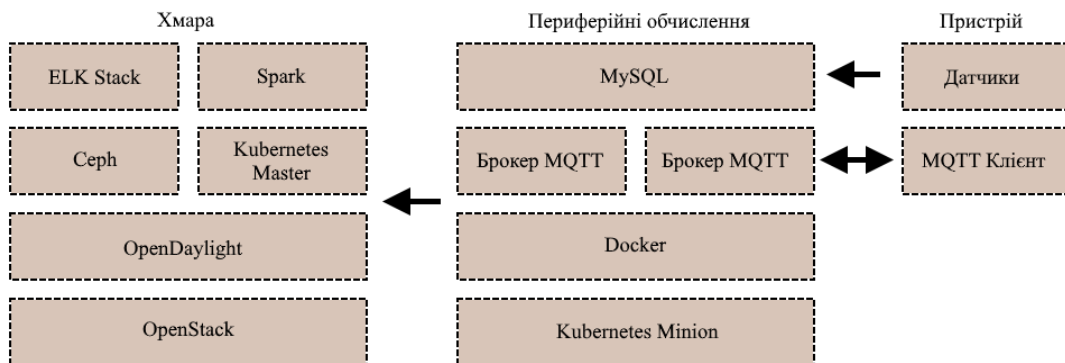


Рис. 3. Архітектура системи з периферійними обчисленнями [5]

У реалізації використовуються пристрої Raspberry Pi як вузли периферійних обчислень, які розгортаються та керуються через Kubernetes. Це налаштування забезпечує більш розподілену модель обчислень, наближаючи обробку даних до джерела та значно зменшуючи затримку. Вибір Raspberry Pi для вузлів попередніх обчислень підкреслює прагнення системи до економічності та доступності, а також переваги гнучкості та масштабованості Kubernetes.

Як сенсорні вузли система використовує Arduino – рішення, яке відповідає цілям проекту із забезпечення низької вартості та гнучкості. Ці сенсорні вузли спроектовані так, щоб бути мобільними, що розширює можливості системи динамічного контролю якості повітря в різних місцях та середовищах. У

цьому контексті мобільність дає перевагу універсального збору даних, але також створює проблеми у забезпеченні узгодженої передачі даних та управління живленням.

Точки даних, зібрані сенсорними вузлами, передаються з використанням протоколу LoRaWAN, вибраного через можливості дальньої дії та низького енергоспоживання. Цей вибір має вирішальне значення для підтримки мобільних сенсорних вузлів системи, забезпечуючи надійний зв'язок на великих відстанях, забезпечуючи ширше покриття без шкоди для терміну служби батареї.

Ключовим аспектом дослідження є використання програмного забезпечення з відкритим вихідним кодом для програмного компонента системи. Такий підхід не лише знижує витрати, а й заохочує співпрацю спільноти та постійне покращення інфраструктури програмного забезпечення системи. Програмне забезпечення з відкритим вихідним кодом підвищує адаптованість і масштабованість системи, дозволяючи налаштувати і оновлювати її відповідно до потреб і технологій.

У дослідженні підкреслюється важлива думка: хоча хмарні обчислення відіграють основну роль в Інтернеті речей (IoT) та моніторинг якості повітря, їх недостатньо для сценаріїв, що вимагають швидкого аналізу даних. Велика відстань мережної логіки між хмарою та кінцевим пристроєм може легко викликати затримку мережі, тим самим впливаючи на здатність системи оперативного реагувати [5]. Це спостереження наголошує на необхідності впровадження периферійних обчислень, які задовольняють потребу у швидшому аналізі даних за рахунок мінімізації затримок у мережі та забезпечення швидшого реагування на зібрані дані.

У дослідженні Джованні Б. Фіоккола та співавторів представлено новий підхід до моніторингу якості повітря, приділяючи особливу увагу інтеграції пристроїв Інтернету речей (IoT) із хмарними обчисленнями [4]. Це дослідження використовує Arduino як сенсорні вузли, демонструючи акцент на економічній ефективності та доступності технологій моніторингу навколишнього середовища.

Ключовою особливістю системи є використання Wi-Fi передачі даних, що за своєю суттю передбачає високе покриття Wi-Fi. Це позиціонує систему як особливо придатну для міського середовища або «розумних міст», де інфраструктура Wi-Fi добре розвинута. Використання Wi-Fi забезпечує надійне та високошвидкісне з'єднання для передачі даних у хмару, полегшуючи моніторинг та аналіз у реальному часі. Однак це також означає, що ефективність системи тісно пов'язана з доступністю та стабільністю мереж Wi-Fi, що потенційно обмежує її застосування в районах з поганим покриттям Wi-Fi.

Одним із інноваційних аспектів цього дослідження є інтелектуальний підхід до енергозбереження, який включає вмикання датчиків на вимогу. Цей метод значно знижує енергоспоживання, сприяючи стійкості системи та забезпечуючи безперервну роботу без необхідності частого обслуговування або заміни батареї. Вузли датчиків стаціонарні та під'єднані до постійного джерела живлення, що додатково забезпечує їх безперебійну роботу. Хоча таке встановлення гарантує стабільне джерело живлення, це також означає, що необхідно ретельно продумати розміщення датчиків для оптимізації покриття та точності даних [4].

Дослідження 2022 року, проведене Серджіо Паломеке-Мангуттом та співавторами представляє інноваційний підхід до моніторингу якості повітря за допомогою розробки переносної системи інтегрованої в бездротову сенсорну мережу (WSN), яка використовує хмарні обчислення для управління та аналізу даних [6]. Це дослідження знаменує собою значний крок вперед в області персональних пристроїв моніторингу навколишнього середовища завдяки розробці компактного пристрою (39 мм × 33 мм), оснащеного акумулятором, що спрощує використання і забезпечує безперервний моніторинг людьми під час їх повсякденної діяльності.

Ключовим аспектом цієї системи є метод передачі даних, в якому використовується програма для смартфона, підключена через Bluetooth. Цей підхід ефективно усуває розрив між пристроєм і хмарою, забезпечуючи безперешкодну передачу зібраних даних в хмару для зберігання та аналізу. Використання програми для смартфона передачі даних підкреслює інноваційне використання системою широко доступних технологій для підтримки зусиль з моніторингу навколишнього середовища.

Переносний пристрій пристрій описується як власноруч розроблена вбудована система. Такий вибір забезпечує продуктивність, специфічну для конкретного застосування, і підвищену надійність, що відрізняє його від готових рішень. Адаптувавши конструкцію пристрою до конкретних потреб моніторингу якості повітря, дослідники оптимізували його функціональність та надійність.

Однак у дослідженні визнаються обмеження використання недорогих газових датчиків у таких пристроях. Якість даних, одержуваних цими датчиками, відповідає якості даних, одержуваних референтними методами, що використовуються традиційних станціях моніторингу. Датчики схильні до різних проблем, включаючи перехресну чутливість, погану селективність, дрейф, старіння, недостатню межу виявлення та чутливість до метеорологічних умов. Ці проблеми наголошують на невід'ємних компромісах, пов'язаних з розробкою економічно ефективних і широко застосованих рішень для моніторингу якості повітря.

Щоб усунути деякі з цих обмежень, в дослідженні використовуються технології машинного навчання (ML). Алгоритми машинного навчання застосовуються для поліпшення інтерпретації даних датчиків, підвищуючи здатність системи надавати змістовну інформацію про якість повітря. Таке

використання технологій машинного навчання є спробою пом'якшити обмеження датчиків, підвищуючи точність і надійність даних за рахунок передових методів аналізу даних [6].

Дослідження під назвою «Виявлення, аналіз та прогнозування якості повітря за допомогою хмарних технологій — додаток розумного міста для розумної охорони здоров'я», проведене Яшем Мехтою та співавторами досліджує інтеграцію хмарних обчислень, штучного інтелекту та технологій інтернету речей для покращення якості моніторингу повітря у межах розумного міста [1]. У цьому дослідженні представлений комплексний підхід до виявлення, аналізу та прогнозування тенденцій якості повітря з використанням стільникових з'єднань для передачі даних, що забезпечує широке охоплення та надійний зв'язок, що має вирішальне значення для аналізу даних у реальному часі у міських ландшафтах.

Відмінною особливістю системи є використання штучного інтелекту для аналізу історичних даних з метою прогнозування майбутніх умов якості повітря. Ця здатність прогнозування відіграє важливу роль в ініціативах щодо запобігання міському плануванню та громадській охороні здоров'я, дозволяючи міським адміністраторам та чиновникам охорони здоров'я здійснювати своєчасні заходи, спрямовані на мінімізацію ризиків для здоров'я, пов'язаних із забрудненням.

Крім того, система впроваджує інновації, підраховуючи та класифікуючи транспортні засоби за допомогою камер відеоспостереження, інтегруючи ці дані до аналізу якості повітря. Цей метод дає уявлення про кореляцію між автомобільним рухом та рівнями забруднення повітря, пропонуючи детальне розуміння джерел забруднення у міському середовищі. Такий аналіз має життєво важливе значення для цілеспрямованих заходів щодо контролю забруднення та розробки стратегій управління дорожнім рухом, які сприяють покращенню якості повітря.

Періодичне калібрування датчиків вважається необхідною процедурою підтримки точності даних. У дослідженні описується процес калібрування, що включає введення чистого азоту (N₂) газів камери датчиків і скидання показань до нуля. Це калібрування гарантує, що датчики збережуть свою чутливість і точність з часом, усуваючи потенційні проблеми, пов'язані з дрейфом і старінням [1].

Дослідження «Проектування та впровадження системи моніторингу якості повітря на основі LPWA», проведене Кан Чженом та співавторами, представляє складну систему моніторингу якості повітря, яка використовує технологію Low Power Wide Area (LPWA) для покращення екологічного зондування та збору даних [2]. Це дослідження виділяється тим, що реалізує точку доступу LPWA на платформі програмно-визначуваного радіозв'язку (SDR) з відкритим вихідним кодом, що сигналізує про перехід до більш гнучких і налаштованих рішень в галузі моніторингу навколишнього середовища.

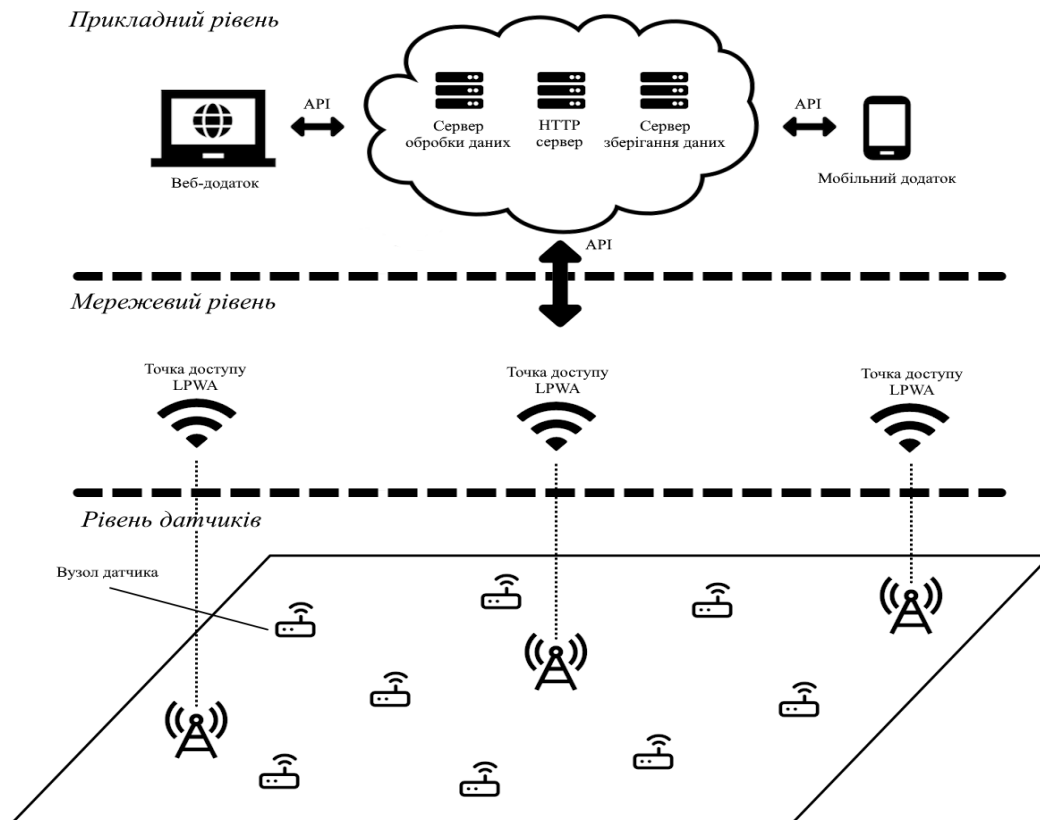


Рис. 4. Архітектура системи моніторингу якості повітря базованої на технології LPWA [2]

Центральним елементом конструкції системи є вузол моніторингу якості повітря, який включає датчики, мікроконтролер і батарею, а також інші компоненти, розроблені авторами. Такий індивідуальний підхід до побудови вузла моніторингу дозволяє проводити індивідуальну оптимізацію задоволення конкретних вимог збору та аналізу даних про якість повітря.

Примітною особливістю системи моніторингу є її стратегія електроживлення. Вузли оснащені системою сонячних батарей, яка забезпечує тривалу автономну роботу без необхідності частого обслуговування або заміни акумуляторів. Це рішення для стійкого енергопостачання не тільки покращує вплив системи на навколишнє середовище, але також підтримує її розгортання у віддалених чи важкодоступних районах.

Проте дослідження визнає, що вартість впровадження цієї системи на основі LPWA вища, ніж попередні підходи. Це зростання витрат пояснюється передовими технологіями та спеціальними компонентами, необхідними для роботи системи, які, хоч і підвищують продуктивність та можливість, також створюють перешкоди для широкого впровадження. Для зниження енергоспоживання та продовження терміну служби сенсорних вузлів у системі передбачено механізми очікування. Ці механізми дозволяють вузлам переходити в стан зниженого енергоспоживання, коли активний моніторинг не потрібен, тим самим заощаджуючи енергію та знижуючи експлуатаційні витрати, пов'язані з використанням енергії.

Використання протоколу LPWA передачі даних є критичним аспектом цієї системи. Можливості телекомунікації LPWA дозволяють ефективно збирати дані на великих територіях, що робить його ідеальним для додатків моніторингу навколишнього середовища, що охоплюють великі географічні регіони. Мережева архітектура включає ряд точок доступу, які отримують дані від сенсорних вузлів. Ця структура полегшує надійну передачу зібраних даних до центрального сховища для аналізу, забезпечуючи комплексний моніторинг якості повітря у різних середовищах [2].

ВИСНОВКИ З ДАНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ

І ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ РОЗВІДОК У ДАНОМУ НАПРЯМІ

Отже, вивчення сучасних досліджень у галузі хмарних та IoT-систем моніторингу якості повітря розкриває динамічну та розвиваючу область, що характеризується інноваційними підходами до збору, аналізу та прогнозування екологічних даних. У всіх розглянутих дослідженнях загальною темою є пошук масштабованих, економічно ефективних рішень, здатних надавати точні дані про якість повітря в режимі реального часу, необхідні вирішення глобальної проблеми забруднення повітря.

Впровадження недорогих датчиків і платформ з відкритим вихідним кодом, як показано у низці досліджень, демократизує моніторинг якості повітря, роблячи його більш доступним для ширшого кола зацікавлених сторін. Використання Arduino та Raspberry Pi для сенсорних вузлів у поєднанні з протоколами стільникового зв'язку, Wi-Fi та LPWA для передачі даних підкреслює тенденцію до використання існуючих технологій та інфраструктури для зниження витрат та підвищення зручності розгортання системи. Однак ці підходи не лишені проблем. Використання недорогих датчиків часто призводить до компромісів щодо якості даних, при цьому такі проблеми, як перехресна чутливість, дрейф та старіння впливають на точність. Більш того, залежність від широкого покриття Wi-Fi або стільникових мереж може обмежити застосування цих систем у віддалених або слаборозвинених районах.

Інтеграція технологій штучного інтелекту та машинного навчання знаменує собою значний прогрес у моніторингу якості повітря, дозволяючи не лише аналізувати дані про довкілля у реальному часі, а й прогнозувати майбутні тенденції якості повітря. Ця здатність прогнозування має вирішальне значення для ефективного міського планування та заходів громадського охорони здоров'я. Проте складність та вимоги до ресурсів для реалізації цих технологій вимагають постійних інвестицій у обчислювальні ресурси та досвід. Енергоефективність стає найважливішим фактором, оскільки в кількох дослідженнях враховувалися механізми сонячної енергії та сну для продовження терміну служби вузлів моніторингу. Ці стратегії вирішують деякі проблеми стійкості, пов'язані з постійним моніторингом навколишнього середовища, але також спричиняють додаткові витрати та технологічні складності.

Перехід до портативних систем моніторингу якості повітря та розробка систем на базі LPWA є інноваційною відповіддю на потребу в більш персоналізованому та охоплюючому моніторингу навколишнього середовища. Ці підходи відкривають перспективні можливості для збору більш детальних та індивідуальних даних про якість повітря на більших географічних територіях. Тим не менш, більш високі витрати, пов'язані з цими технологіями, а також проблеми, пов'язані з калібруванням, управлінням живленням та точністю датчиків, наголошують на необхідності подальших досліджень та розробок.

Таким чином, нинішній ландшафт досліджень у галузі моніторингу якості повітря демонструє чітку траєкторію до більш пов'язаних, інтелектуальних та доступних систем. Ці досягнення мають значний потенціал для покращення нашого розуміння та управління якістю повітря. Однак повна реалізація цього потенціалу потребує вирішення таких проблем, як точність датчиків, вартість системи та технологічна складність. Оскільки ця область продовжує розвиватися, майбутні дослідження повинні поєднувати

інновації з практичністю, гарантуючи, що технології моніторингу якості повітря будуть не тільки передовими, але й застосовними та стійкими в різних реальних контекстах.

Література

1. Cloud enabled air quality detection, analysis and prediction - A smart city application for smart health [Електронний ресурс] / Yash Mehta [та ін.] // 2016 3rd MEC International Conference on Big Data and Smart City (ICBDSC), Muscat, 15–16 берез. 2016 р. – [Б. м.], 2016. – Режим доступу: <https://doi.org/10.1109/icbdsc.2016.7460380>
2. Design and Implementation of LPWA-Based Air Quality Monitoring System [Електронний ресурс] / Kan Zheng [та ін.] // IEEE Access. – 2016. – Т. 4. – С. 3238–3245. – Режим доступу: <https://doi.org/10.1109/access.2016.2582153>
3. Developing a Cloud-Based Air Quality Monitoring Platform Using Low-Cost Sensors [Електронний ресурс] / Abdul Samad [та ін.] // Sensors. – 2024. – Т. 24, № 3. – С. 945. – Режим доступу: <https://doi.org/10.3390/s24030945>
4. Polluino: An efficient cloud-based management of IoT devices for air quality monitoring [Електронний ресурс] / Giovanni B. Fioccola [та ін.] // 2016 IEEE 2nd International Forum on Research and Technologies for Society and Industry Leveraging a better tomorrow (RTSI), Bologna, Italy, 7–9 верес. 2016 р. – [Б. м.], 2016. – Режим доступу: <https://doi.org/10.1109/rtsi.2016.7740617>
5. The Implementation of a Cloud-Edge Computing Architecture Using OpenStack and Kubernetes for Air Quality Monitoring Application [Електронний ресурс] / Endah Kristiani [та ін.] // Mobile Networks and Applications. – 2020. – Режим доступу: <https://doi.org/10.1007/s11036-020-01620-5>
6. Wearable system for outdoor air quality monitoring in a WSN with cloud computing: Design, validation and deployment [Електронний ресурс] / Sergio Palomeque-Mangut [та ін.] // Chemosphere. – 2022. – Т. 307. – С. 135948. – Режим доступу: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.135948>
7. Wireless Sensor Network Combined with Cloud Computing for Air Quality Monitoring [Електронний ресурс] / Patricia Arroyo [та ін.] // Sensors. – 2019. – Т. 19, № 3. – С. 691. – Режим доступу: <https://doi.org/10.3390/s19030691>

References

1. Cloud enabled air quality detection, analysis and prediction - A smart city application for smart health [Electronic resource] / Yash Mehta [et al.] // 2016 3rd MEC International Conference on Big Data and Smart City (ICBDSC), Muscat, 15–16 March 2016. – [S. l.], 2016. – Mode of access: <https://doi.org/10.1109/icbdsc.2016.7460380>
2. Design and Implementation of LPWA-Based Air Quality Monitoring System [Electronic resource] / Kan Zheng [et al.] // IEEE Access. – 2016. – Vol. 4. – P. 3238–3245. – Mode of access: <https://doi.org/10.1109/access.2016.2582153>
3. Developing a Cloud-Based Air Quality Monitoring Platform Using Low-Cost Sensors [Electronic resource] / Abdul Samad [et al.] // Sensors. – 2024. – Vol. 24, no. 3. – P. 945. – Mode of access: <https://doi.org/10.3390/s24030945>
4. Polluino: An efficient cloud-based management of IoT devices for air quality monitoring [Electronic resource] / Giovanni B. Fioccola [et al.] // 2016 IEEE 2nd International Forum on Research and Technologies for Society and Industry Leveraging a better tomorrow (RTSI), Bologna, Italy, 7–9 September 2016. – [S. l.], 2016. – Mode of access: <https://doi.org/10.1109/rtsi.2016.7740617>
5. The Implementation of a Cloud-Edge Computing Architecture Using OpenStack and Kubernetes for Air Quality Monitoring Application [Electronic resource] / Endah Kristiani [et al.] // Mobile Networks and Applications. – 2020. – Mode of access: <https://doi.org/10.1007/s11036-020-01620-5>
6. Wearable system for outdoor air quality monitoring in a WSN with cloud computing: Design, validation and deployment [Electronic resource] / Sergio Palomeque-Mangut [et al.] // Chemosphere. – 2022. – Vol. 307. – P. 135948. – Mode of access: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.135948>
7. Wireless Sensor Network Combined with Cloud Computing for Air Quality Monitoring [Electronic resource] / Patricia Arroyo [et al.] // Sensors. – 2019. – Vol. 19, no. 3. – P. 691. – Mode of access: <https://doi.org/10.3390/s19030691>