

Хмельницький національний університет
Факультет інформаційних технологій
Кафедра комп'ютерної інженерії та інформаційних систем

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА МАГІСТРА

Галузь знань _____ 12 – Інформаційні технології _____

Спеціальність _____ 123 – Комп'ютерна інженерія _____

на тему «Підсистема моніторингу якості атмосферного повітря у кіберфізичній системі «Розумне місто»»

КвРК1.202128.22.02.02 ПЗ

Виконав: студент 2 курсу, група КІ2м-22-2

Керівник кандидат техн. наук, доцент
Науковий ступінь, вчене звання

До захисту допускаю:
Зав. кафедри КПС, д.т.н., проф.

Т.О. Говорущенко
25 04 2024 р.


Підпис Барановський В.В.
Ініціали, прізвище


Підпис Іванов О.В.
Ініціали, прізвище

Хмельницький – 2024

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Кафедра КОМП'ЮТЕРНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ

Освітній рівень МАГІСТР

Галузь знань 12 ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

Спеціальність 123 КОМП'ЮТЕРНА ІНЖЕНЕРІЯ

Освітня програма ОСВІТНЬО-НАУКОВА ПРОГРАМА «КОМП'ЮТЕРНА ІНЖЕНЕРІЯ ТА ПРОГРАМУВАННЯ»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедри Т.О.Говорущенко

" 01 " 09 2023 р.

**ЗАВДАННЯ
НА ДИПЛОМНИЙ ПРОЕКТ (РОБОТУ)**

Барановському Владиславу Володимировичу
Прізвище, ім'я, по батькові студента

1. Тема проекту (роботи) Підсистема моніторингу якості атмосферного повітря у кіберфізичній системі «Розумне місто»

Керівник проекту (роботи) Іванов О.В., к.т.н., доцент
Прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання

Затверджена наказом ректора університету від 01.01.2024 р. № 1

2. Строк подання студентом проекту (роботи) на кафедру 01.05.2024 р.

3. Вихідні дані до проекту (роботи) Завдання на кваліфікаційну роботу

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) _____
Аналіз відомих методів та рішень для моніторингу якості атмосферного повітря у кіберфізичній системі «Розумне місто»

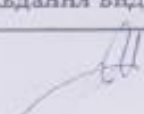



Моделювання процесу моніторингу якості атмосферного повітря у кіберфізичній системі «Розумне місто»

Метод та алгоритм моніторингу якості атмосферного повітря у кіберфізичній системі «Розумне місто»

Підсистема моніторингу якості атмосферного повітря у кіберфізичній системі «Розумне місто»

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслень) _____

6. Консультанти розділів дипломного проекту (роботи)

| Розділ | Прізвище, ініціали та посада консультанта | Підпис, дата | |
|---------------|---|---|---|
| | | завдання видав | завдання прийняв |
| Нормоконтроль | Лисенко С.М., професор кафедри КПС |  |  |
| Антиплагиат | Нічепорук А.О., доцент кафедри КПС |  |  |

7. Дата видачі завдання « 01 » _____ 09 _____ 2023 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

| №з/п | Назва етапів (розділів) дипломного проекту (роботи) | Термін виконання етапів проекту (роботи) | Примітка |
|------|---|--|----------|
| 1 | Вибір напрямку дослідження та узгодження тематики кваліфікаційної роботи з керівником | 01.09.2023 | виконано |
| 2 | Ознайомлення з предметною областю; формулювання мети та задач дослідження; визначення об'єкта та предмета дослідження | 01.10.2023 | виконано |
| 3 | Робота над розділом 1 – аналіз відомих моделей, методів за темою; постановка задачі | 01.11.2023 | виконано |
| 4 | Робота над розділом 2 – розробка моделей для вирішення поставленої задачі | 01.12.2023 | виконано |
| 5 | Робота над науковою статтею | 01.02.204 | виконано |
| 6 | Робота над розділом 3 – розробка методів для вирішення поставленої задачі | 15.02.2024 | виконано |
| 7 | Робота над розділом 4 – проектування та розробка ПЗ для вирішення поставленої задачі, експериментальна частина | 01.04.204 | виконано |
| 8 | Оформлення пояснювальної записки згідно вимог | 18.04.2024 | виконано |
| 9 | Попередній захист кваліфікаційної роботи | 29.04.2024 | виконано |
| 10 | Захист кваліфікаційної роботи на засіданні ЕК | До 15.05.2024 | |

Студент

Керівник проекту (роботи)


 Підпис: Барановський В.В.
 Ініціали, прізвище


 Підпис: Іванов О.В.
 Ініціали, прізвище

РЕФЕРАТ

Тема кваліфікаційної роботи: Підсистема моніторингу якості атмосферного повітря у кіберфізичній системі «Розумне місто».

Автор роботи: Барановський В.В., студент групи КІ2М-22-2.

Керівник роботи: Іванов О.В., кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерної інженерії та інформаційних систем.

Пояснювальна записка: 118 с., 16 рис., 0 табл., 2 дод., 99 джерел.

ПЕРЕЛІК КЛЮЧОВИХ СЛІВ: кіберфізична система «Розумне місто», підсистема моніторингу якості атмосферного повітря, датчик SHT20, датчик Nova SDS011, датчик Radex RD1503, датчик Figaro TGS 2600, датчик Horiba APDA-372, датчик SGX Sensortech MiCS-VZ-86, контролер ESP32, стандарт для передачі даних MQTT.

Об'єктом дослідження є процес моніторингу якості атмосферного повітря у кіберфізичній системі «Розумне місто».

Предметом дослідження є метод та підсистема моніторингу якості атмосферного повітря у кіберфізичній системі «Розумне місто».

Метою кваліфікаційної роботи є моніторинг якості атмосферного повітря, зокрема, автоматичний контроль за рівнем вологості, температури, вмісту пилу, в тому числі частинок PM2.5, PM10, радіаційного фону, забруднення оксидами азоту, сіркою, вуглецевими сполуками, парниковими газами типу CO, CO₂, NH₃, NO тощо, а також інших шкідливих речовин шляхом створення підсистеми моніторингу якості атмосферного повітря у кіберфізичній системі «Розумне місто».

Для розв'язання поставлених задач використовуються основні положення системного аналізу (ієрархічності, декомпозиції та ін.), загальної теорії систем, теорії моделювання процесів. При проведенні моделювання процесу моніторингу якості атмосферного повітря та при розробленні методу моніторингу якості атмосферного повітря використано теоретико-множинні підходи, методи концептуального моделювання, евристичні оцінки, принципи побудови баз знань та формування логічного висновку.

Наукова новизна отриманих результатів:

1) вперше розроблено метод моніторингу якості атмосферного повітря у кіберфізичній системі «Розумне місто», який відрізняється від відомих своєю орієнтованістю на реалізацію у вигляді підсистеми ефективного моніторингу якості атмосферного повітря у кіберфізичній системі «Розумне місто» і надає точну та актуальну інформацію про якість повітря, а також дозволяє приймати обґрунтовані рішення щодо сповіщення мешканців про небезпеку із наданням рекомендацій щодо захисту їх здоров'я;

2) вперше розроблено архітектуру підсистеми моніторингу якості атмосферного повітря у кіберфізичній системі «Розумне місто», яка відрізняється від відомих нижчою ціною, вищою точністю, простотою у використанні та виконує збір даних з встановлених датчиків вимірювання параметрів повітря, обробку та аналіз отриманих даних в реальному часі, візуалізацію результатів моніторингу якості повітря у вигляді карти міста з n районів із відображенням всіх параметрів повітря з адаптацією візуалізації результатів під потреби користувача, а також сигналізацію про небезпеку в даному районі міста із наданням рекомендацій щодо захисту здоров'я мешканців в такому випадку.

Практична значущість отриманих результатів полягає у реалізації підсистеми моніторингу якості атмосферного повітря у кіберфізичній системі «Розумне місто», яка забезпечує збір даних з встановлених датчиків, візуалізацію результатів моніторингу якості повітря та сигналізацію про небезпеку в даному районі міста із наданням рекомендацій щодо захисту здоров'я мешканців в такому випадку.

ЗМІСТ

| | |
|---|----|
| ВСТУП | 5 |
| 1 АНАЛІЗ ВІДОМИХ МЕТОДІВ ТА РІШЕНЬ ДЛЯ МОНІТОРИНГУ ЯКОСТІ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ У КІБЕРФІЗИЧНІЙ СИСТЕМІ «РОЗУМНЕ МІСТО» | 10 |
| 1.1 Кіберфізична система «Розумне місто» | 10 |
| 1.2 Моніторинг якості атмосферного повітря у кіберфізичній системі «Розумне місто»..... | 19 |
| 1.3 Висновки. Постановка задачі..... | 27 |
| 2 МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ МОНІТОРИНГУ ЯКОСТІ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ У КІБЕРФІЗИЧНІЙ СИСТЕМІ «РОЗУМНЕ МІСТО» | 27 |
| 2.1 Вибір складових частин підсистеми моніторингу якості атмосферного повітря кіберфізичної системи «Розумне місто» | 28 |
| 2.2 Моделювання процесу моніторингу стану якості атмосферного повітря у кіберфізичній системі «Розумне місто» | 51 |
| 2.3 Висновки | 55 |
| 3 МЕТОД ТА АЛГОРИТМ МОНІТОРИНГУ ЯКОСТІ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ У КІБЕРФІЗИЧНІЙ СИСТЕМІ «РОЗУМНЕ МІСТО» | 57 |
| 3.1 Метод моніторингу якості атмосферного повітря у кіберфізичній системі «Розумне місто» | 57 |
| 3.2 Алгоритм моніторингу якості атмосферного повітря у кіберфізичній системі «Розумне місто» | 65 |
| 3.3 Висновки | 69 |
| 4 ПІДСИСТЕМА МОНІТОРИНГУ ЯКОСТІ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ У КІБЕРФІЗИЧНІЙ СИСТЕМІ «РОЗУМНЕ МІСТО» | 70 |

| | |
|--|-----|
| 4.1 Підсистема моніторингу якості атмосферного повітря у кіберфізичній системі «Розумне місто» | 70 |
| 4.2 Приклади функціонування підсистеми моніторингу якості атмосферного повітря у кіберфізичній системі «Розумне місто» | 73 |
| 4.3 Висновки | 84 |
| ВИСНОВКИ | 85 |
| ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ | 90 |
| ДОДАТОК А. Копія статті | 99 |
| ДОДАТОК Б. Презентація до захисту кваліфікаційної роботи | 110 |

ВСТУП

«Розумне місто» – це концепція розвитку міст, яка передбачає використання інноваційних технологій та інтеграцію цифрових рішень для покращення якості життя мешканців та ефективного управління міською інфраструктурою. Основною метою «розумного міста» є створення життєздатного, екологічно чистого, ефективного та інноваційного середовища для проживання людей [1-3]. Розумні міста та Інтернет речей уможливили інтеграцію комунікаційних пристроїв для ефективного прийняття рішень [2]. Враховуючи, що, за даними ООН, очікується, що до 2050 року понад 72% населення планети проживатиме в містах, то ефективне прийняття рішень та ефективна організація мешканців міста з використанням концепції «Розумне місто», новий підхід до міського планування, який використовує дані та технології для підвищення якості життя мешканців, одночасно зменшуючи вплив урбанізації на навколишнє середовище є як ніколи актуальними [3].

Основні характеристики «розумного міста» [3-5]:

1) інтегрована мережа зв'язку та Інтернет речей – встановлення датчиків та інших пристроїв, які збирають дані про різні аспекти міського життя, такі як транспорт, енергетика, водопостачання, відходи, безпека тощо;

2) цифрові технології та аналітика даних – використання аналізу даних для прийняття обґрунтованих управлінських рішень та оптимізації різних процесів у місті;

3) ефективне управління ресурсами – використання технологій для оптимізації використання енергії, води, транспорту та інших ресурсів з метою зменшення споживання та покращення ефективності;

4) інфраструктура для мобільності – розвиток інфраструктури для стимулювання екологічно чистих видів транспорту, таких як велосипеди, електромобілі та громадський транспорт, з метою зменшення заторів та забруднення повітря;

5) активна участь громади – залучення мешканців міста до процесу прийняття рішень з використанням цифрових платформ та механізмів зворотного зв'язку;

б) безпека та захист даних – забезпечення захисту персональних даних та кібербезпеки в умовах широкого використання цифрових технологій.

Реалізація концепції «розумного міста» сприяє створенню міст, які є більш життєздатними, конкурентоспроможними, екологічно чистими та комфортними для проживання.

Забруднення повітря – це наявність у атмосферному повітрі різних шкідливих речовин, які можуть бути викинуті в результаті промислової, транспортної, агропромислової та інших людських діяльностей. Забруднення повітря є серйозною екологічною проблемою в нашому повсякденному житті. Погіршення якості повітря негативно впливає на здоров'я населення та навколишнє середовище. Забруднення навколишнього середовища та якість повітря стають все більш важливими темами у сферах «Розумного міста» та державного регулювання. Моніторинг якості атмосферного повітря в кіберфізичній системі «Розумне місто» відіграє ключову роль у забезпеченні здоров'я та комфорту мешканців, а також у збереженні навколишнього середовища. Система моніторингу якості повітря в режимі реального часу допомагає відстежувати раптові зміни в атмосфері [6-8]. Вирішення проблем забруднення є одним з головних викликів, з якими стикаються міста в наш час, оскільки саме міста є основними джерелами викидів забруднюючих речовин, а також з іншого боку є територіями, де вплив забруднення на здоров'я людей (особливо на дихальні шляхи, серцево-судинну систему та нервову систему) є доволі значним. Отже, моніторинг якості повітря в містах має вирішальне значення, оскільки він є попереднім і необхідним кроком для розробки та подальшого виконання заходів, спрямованих на зменшення забруднення з метою збереження здоров'я громадян [9].

Моніторинг якості повітря в кіберфізичній системі «Розумне місто» виконується завдяки розміщенню по всьому місту датчиків для вимірювання різних параметрів якості повітря, таких як вологість, температура, вміст пилу, в тому числі

частинок PM2.5, PM10, радіаційний фон, забруднення оксидами азоту, сіркою, вуглецевими сполуками, парниковими газами типу CO, CO₂, NH₃, NO тощо, а також інших шкідливих речовин. Дані з датчиків аналізуються та опрацьовуються, в результаті чого мешканцям міста можуть розсилатись сповіщення в разі сильного забруднення повітря та поради щодо захисту їх здоров'я [9-11]. Моніторинг якості атмосферного повітря в кіберфізичній системі «Розумне місто» є важливим інструментом для забезпечення безпеки та комфорту мешканців, покращення якості життя та збереження навколишнього середовища [12-14].

Отже, безперервний автоматичний моніторинг якості атмосферного повітря у кіберфізичній системі «Розумне місто» є *актуальною задачею*. *Метою кваліфікаційної роботи* є моніторинг якості атмосферного повітря, зокрема, автоматичний контроль за рівнем вологості, температури, вмісту пилу, в тому числі частинок PM2.5, PM10, радіаційного фону, забруднення оксидами азоту, сіркою, вуглецевими сполуками, парниковими газами типу CO, CO₂, NH₃, NO тощо, а також інших шкідливих речовин шляхом створення підсистеми моніторингу якості атмосферного повітря у кіберфізичній системі «Розумне місто».

Поставлена мета досягається розв'язанням таких основних *задач*:

- 1) аналіз відомих методів та рішень для моніторингу якості атмосферного повітря;
- 2) моделювання процесу моніторингу якості атмосферного повітря у кіберфізичній системі «Розумне місто»;
- 3) розроблення методу моніторингу якості атмосферного повітря;
- 4) розроблення архітектури підсистеми моніторингу якості атмосферного повітря кіберфізичної системи «Розумне місто»;
- 5) проведення експериментів із використанням розробленої підсистеми моніторингу якості атмосферного повітря кіберфізичної системи «Розумне місто».

Об'єктом дослідження є процес моніторингу якості атмосферного повітря у кіберфізичній системі «Розумне місто».

Предметом дослідження є метод та підсистема моніторингу якості атмосферного повітря у кіберфізичній системі «Розумне місто».

Наукова новизна отриманих результатів:

1) вперше розроблено метод моніторингу якості атмосферного повітря у кіберфізичній системі «Розумне місто», який відрізняється від відомих своєю орієнтованістю на реалізацію у вигляді підсистеми ефективного моніторингу якості атмосферного повітря у кіберфізичній системі «Розумне місто» і надає точну та актуальну інформацію про якість повітря, а також дозволяє приймати обґрунтовані рішення щодо сповіщення мешканців про небезпеку із наданням рекомендацій щодо захисту їх здоров'я;

2) вперше розроблено архітектуру підсистеми моніторингу якості атмосферного повітря у кіберфізичній системі «Розумне місто», яка відрізняється від відомих нижчою ціною, вищою точністю, простотою у використанні та виконує збір даних з встановлених датчиків вимірювання параметрів повітря, обробку та аналіз отриманих даних в реальному часі, візуалізацію результатів моніторингу якості повітря у вигляді карти міста з n районів із відображенням всіх параметрів повітря з адаптацією візуалізації результатів під потреби користувача, а також сигналізацію про небезпеку в даному районі міста із наданням рекомендацій щодо захисту здоров'я мешканців в такому випадку.

Практична значущість отриманих результатів полягає у реалізації підсистеми моніторингу якості атмосферного повітря у кіберфізичній системі «Розумне місто», яка забезпечує збір даних з встановлених датчиків, візуалізацію результатів моніторингу якості повітря та сигналізацію про небезпеку в даному районі міста із наданням рекомендацій щодо захисту здоров'я мешканців в такому випадку.

Методи дослідження. Для розв'язання поставлених задач використовуються основні положення системного аналізу (ієрархічності, декомпозиції та ін.), загальної теорії систем, теорії моделювання процесів. При проведенні моделювання процесу моніторингу якості атмосферного повітря та при розробленні методу моніторингу якості атмосферного повітря використано теоретико-множинні підходи, методи концептуального моделювання, евристичні оцінки, принципи побудови баз знань та формування логічного висновку.

За темою кваліфікаційної роботи опублікована одна стаття у фаховому науковому журналі України категорії Б (додаток А):

1) Т. Novorushchenko, V. Baranovskyi, O. Ivanov, A. Hnatchuk. Subsystem for monitoring atmospheric air quality in the cyber-physical system “Smart city”. Computer systems and information technologies. 2024. №1.

1 АНАЛІЗ ВІДОМИХ МЕТОДІВ ТА РІШЕНЬ ДЛЯ МОНІТОРИНГУ ЯКОСТІ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ У КІБЕРФІЗИЧНІЙ СИСТЕМІ «РОЗУМНЕ МІСТО»

1.1 Кіберфізична система «Розумне місто»

Кіберфізична система «Розумне місто» – це інноваційна інтегрована платформа, яка поєднує в собі технології збору та аналізу даних, системи зв'язку та інформаційні технології з метою покращення якості життя мешканців міста, оптимізації управління міською інфраструктурою та підвищення ефективності різних сфер життєдіяльності міста. Це інтегрована система, яка поєднує фізичні та цифрові складові для оптимізації управління міськими ресурсами, поліпшення якості життя мешканців та забезпечення ефективної роботи муніципальних служб, сприяє створенню інноваційних рішень для вирішення складних міських проблем та покращенню якості життя. Така система дозволяє збирати великі обсяги даних з різних джерел, аналізувати їх в реальному часі та приймати рішення на основі цієї інформації [15-17]. Розумні міста розглядаються як каталізатори перетворення соціально-економічного середовища міста на більш наукомістке та екологічне [16].

«Розумне місто» – це концепція розвитку міст, яка передбачає використання інноваційних технологій та інтеграцію цифрових рішень для покращення якості життя мешканців та ефективного управління міською інфраструктурою. Основною метою «розумного міста» є створення сталого, життєздатного, екологічно чистого, ефективного, комфортного та інноваційного міського середовища для проживання людей, яке відповідає потребам сучасного суспільства [1-3]. Розумні міста та Інтернет речей уможливили інтеграцію комунікаційних пристроїв для ефективного прийняття рішень [2]. Враховуючи, що, за даними ООН, очікується, що до 2050 року понад 72% населення планети проживатиме в містах, то ефективно прийняття рішень та ефективна організація мешканців міста з використанням концепції «розумне місто», новий підхід до міського планування, який використовує дані та технології для підвищення якості життя мешканців, одночасно зменшуючи вплив урбанізації на навколишнє середовище є як ніколи актуальними [3].

Основні характеристики та аспекти «розумного міста» [3-5]:

1) інтегрована мережа зв'язку та Інтернет речей – встановлення датчиків та інших пристроїв, які збирають дані про різні аспекти міського життя, такі як транспорт, енергетика, водопостачання, відходи, безпека тощо; кіберфізична система «Розумне місто» забезпечує збір, обробку та аналіз великої кількості даних з різних джерел, таких як сенсори, камери відеоспостереження, транспортні системи тощо; це дозволяє муніципалітетам отримувати цінну інформацію для прийняття рішень, вирішення проблем та вдосконалення міського середовища;

2) системи моніторингу та управління інфраструктурою – різноманітні датчики та пристрої для збору даних про транспортні потоки, рівень забруднення повітря, використання енергії, системи безпеки тощо; ці дані аналізуються та використовуються для оптимізації роботи міської інфраструктури та прийняття стратегічних рішень щодо розвитку міста; завдяки алгоритмам штучного інтелекту та аналітичним моделям, кіберфізична система «Розумне місто» може автоматизувати управління ресурсами, такими як енергія, вода, відходи, оптимізуючи їх використання та знижуючи негативний вплив на навколишнє середовище;

3) цифрові технології та аналітика даних – використання аналізу даних для прийняття обґрунтованих управлінських рішень та оптимізації різних процесів у місті;

4) ефективне управління ресурсами – використання технологій для оптимізації використання енергії, води, транспорту та інших ресурсів з метою зменшення споживання та покращення ефективності; наприклад, кіберфізична система «Розумне місто» допомагає вирішувати проблеми транспортного руху, зменшує затори та час очікування, покращує громадський транспорт та стимулює використання екологічно чистих транспортних засобів; кіберфізична система «Розумне місто» забезпечує постійний моніторинг безпеки, виявлення надзвичайних ситуацій та вчасну реакцію на них – наприклад, виявлення пожеж, викидів шкідливих речовин у повітря чи воду, а також моніторинг стану

інфраструктури, що дозволяє попереджати аварійні ситуації на дорогах, міських мережах тощо;

5) управління енергоефективністю – використання «розумних» систем енергозабезпечення та моніторингу дозволяє ефективно використовувати електроенергію та знижувати втрати, сприяючи зменшенню енерговитрат та викидів парникових газів;

6) інфраструктура для мобільності, доступності та інклюзивності – кіберфізична система «Розумне місто» допомагає створювати місто, яке є доступним та інклюзивним для всіх мешканців, незалежно від їхніх потреб та можливостей; це включає в себе доступність для людей з обмеженими можливостями, старшого покоління, а також забезпечення рівних можливостей для всіх груп населення, а також розвиток інфраструктури для стимулювання екологічно чистих видів транспорту, таких як велосипеди, електромобілі та громадський транспорт, з метою зменшення заторів та забруднення повітря;

7) активна участь громади – залучення мешканців міста до процесу прийняття рішень з використанням цифрових платформ та механізмів зворотного зв'язку; кіберфізична система «Розумне місто» створює умови для активної участі громадян у прийнятті рішень щодо розвитку міста, забезпечуючи доступ до публічної інформації, платформ для звернень та діалогу з муніципальними органами; успішна реалізація кіберфізичної системи «Розумне місто» вимагає партнерства та співпраці між владними органами, промисловими підприємствами, академічними установами та громадським сектором; тільки шляхом спільних зусиль можна досягти значних успіхів у впровадженні інновацій та вирішенні складних викликів сучасного міського життя; активна взаємодія містян з муніципалітетом та іншими органами влади може бути реалізована через платформи для зворотного зв'язку, онлайн-консультації, а також через участь мешканців у процесах збору даних та прийняття рішень щодо розвитку міста;

8) поліпшення якості життя мешканців – кіберфізична система «Розумне місто» спрямована на покращення якості життя мешканців шляхом забезпечення доступу до медичних та освітніх послуг, створення комфортних умов для розваг та

відпочинку, покращення безпеки на вулицях, поліпшення умов проживання та розвиток громадських просторів тощо; впровадження кіберфізичної системи «Розумне місто» сприяє покращенню якості життя мешканців міста шляхом забезпечення комфорту, безпеки, ефективності та зручності у їхньому повсякденному житті;

9) безпека та захист даних – забезпечення захисту персональних даних та кібербезпеки в умовах широкого використання цифрових технологій; враховуючи обробку та обмін чутливою інформацією, кіберфізична система «Розумне місто» повинна мати високі стандарти кібербезпеки та захисту приватності даних громадян;

10) розробка інноваційних сервісів – кіберфізична система «Розумне місто» стимулює розвиток нових сервісів та додатків, спрямованих на поліпшення життя мешканців міста; це може включати мобільні додатки для сповіщення про розклади громадського транспорту, сервіси обліку енергоспоживання та контролю за якістю повітря, онлайн-платформи для зв'язку з муніципалітетом та інші;

11) оптимізація міської інфраструктури – кіберфізична система «Розумне місто» допомагає оптимізувати використання міської інфраструктури, зменшуючи затори на дорогах, покращуючи управління освітленням та електроживленням, оптимізуючи системи водопостачання та відведення стічних вод, а також забезпечуючи ефективніше використання громадського транспорту;

12) сталість та екологічність – кіберфізична система «Розумне місто» допомагає розвивати місто у напрямку сталого розвитку та зменшення впливу на навколишнє середовище; це може включати зменшення споживання енергії, зменшення викидів CO₂, впровадження зелених технологій та покращення якості середовища для мешканців;

13) розвиток інноваційної екосистеми – кіберфізична система «Розумне місто» створює платформу для розвитку інноваційної екосистеми в місті, яка сприяє залученню технологічних стартапів, наукових досліджень та інноваційних проектів для розв'язання міських проблем та покращення якості життя;

14) гнучкість та масштабованість – кіберфізична система «Розумне місто» дозволяє місту бути гнучким та легко адаптовуватися до змінних потреб та вимог мешканців; система, в свою чергу, теж є масштабованою, тобто її можна розширювати та вдосконалювати з часом у відповідь на зростаючі потреби міста;

15) підвищення конкурентоспроможності – розробка та впровадження кіберфізичної системи «Розумне місто» сприяє підвищенню конкурентоспроможності міста як місця для проживання, бізнесу та інновацій; це привертає інвестиції, таланти та підприємства, що сприяє економічному зростанню та розвитку міської інфраструктури.

Реалізація концепції «розумного міста» сприяє створенню міст, які є більш сталими, життєздатними, конкурентоспроможними, ефективними, екологічно чистими та комфортними для проживання.

Основні компоненти кіберфізичної системи «Розумне місто» [18, 19]:

1) датчики – встановлення датчиків по всьому місту для збору даних про різні параметри, такі як рівень забруднення повітря, рух транспорту, рівень шуму, вологість, температура тощо;

2) мережа зв'язку – розгортання мереж зв'язку (наприклад, бездротових, мереж мобільного зв'язку, Інтернету речей тощо) забезпечує передачу даних в реальному часі між датчиками та централізованою системою обробки даних;

3) обробка та аналіз даних – розробка алгоритмів та програмного забезпечення для обробки та аналізу великих обсягів даних, отриманих від сенсорів та інших джерел, з метою виявлення паттернів, трендів та прогнозування подій;

4) інтегрована система управління – створення централізованої системи управління включає в себе інтерфейс для адміністраторів міста, диспетчерські центри, панелі керування та засоби візуалізації даних;

5) системи автоматизації та управління інфраструктурою – використання даних для автоматизації управління різними міськими системами, такими як освітлення, водопостачання, транспорт, відходи, безпека тощо, з метою оптимізації їх функціонування та ефективності;

б) системи зворотного зв'язку та взаємодії з громадою – забезпечення можливості зворотного зв'язку та взаємодії з мешканцями міста за допомогою мобільних додатків, веб-платформ та інших інструментів для повідомлення про проблеми, відгуки та пропозиції щодо покращення сервісів та інфраструктури.

Кіберфізична система «Розумне місто» має великий потенціал у покращенні управління міськими ресурсами, зменшенні негативного впливу на довкілля та підвищенні якості життя мешканців міста.

Кіберфізичні системи «Розумне місто» розвиваються постійно, інтегруючи нові технології, які дозволяють містам стати ще більш ефективними та екологічно чистими, наприклад, використання штучного інтелекту для аналізу даних, розвиток автономних транспортних засобів, впровадження розумних систем енергозабезпечення та багато іншого [20-22]. Кіберфізичні системи «Розумне місто» можуть включати інтелектуальні аналітичні інструменти, які дозволяють містам збирати, обробляти та аналізувати великі обсяги даних для прийняття більш обґрунтованих управлінських рішень, наприклад, для аналізу потоків транспорту для оптимізації руху, прогнозування попиту на комунальні послуги, виявлення місць заторів та прийняття заходів для їх усунення, а також аналізу якості повітря для виявлення джерел забруднення та прийняття заходів для його зменшення [23-25]. Такі кіберфізичні системи є ключовим інструментом для досягнення сучасних цілей розвитку міст та покращення якості життя їх мешканців. Вони дозволяють зробити міста більш ефективними, безпечними, екологічно чистими та комфортними для життя.

Онлайн-платформи для спільної роботи з управління даними датчиків є сервісами з онлайн базами, що дають змогу власникам датчиків реєструвати та під'єднувати свої пристрої для подачі даних до бази в режимі онлайн для зберігання, а також дають змогу розробникам під'єднуватися до бази даних і створювати свої власні додатки, що ґрунтуються на цих даних [26].

Європейський Союз здійснює постійні зусилля, спрямовані на розробку стратегії досягнення «розумного» зростання міст для найбільших міст-регіонів [27]. ЄС розробив цілу низку програм в рамках «порядку денного Європи» [28]. За

оцінками компанії Аруп, світовий ринок розумних міських послуг становив \$400 млрд на рік у 2020 році [29]. Приклади технології «розумного міста» були реалізовані в Мілтон-Кінсі [30], Саутгемптоні [31], Амстердамі [32], Барселоні [33], Стокгольмі [34]. Важливий кластер технологічних компаній «розумних міст» існує в Ізраїлі, де Тель-Авіву було присуджено премію «Світового розумного міста» 2014 року [35].

Розглянемо відомі приклади впровадження концепції «розумне місто», які демонструють різноманітність підходів та інноваційних рішень, що використовуються містами для покращення якості життя та створення стійкої, ефективної та комфортної міської інфраструктури [5].

Амстердамська ініціатива «Розумне місто», започаткована 2009 року, наразі охоплює понад 170 проектів, спільно розроблених місцевими жителями, урядом і бізнесом. Ці проекти розробляються на основі бездротових пристроїв, які служать для підвищення здатності міста приймати рішення в режимі реального часу. Метою проектів є скорочення трафіку, економія енергії та підвищення громадської безпеки. Щоб стимулювати зусилля місцевих жителів, місто щорічно проводить змагання «Розумне Місто», приймаючи пропозиції щодо поліпшень, які вписуються в структуру міста. Прикладом додатку, розробленого жителями міста є «Мобурпарк», який дозволяє власникам паркувальних місць здавати їх в оренду людям за певну плату. Дані, отримані з цього додатка, потім можуть бути використані містом для визначення попиту на паркування і транспортних потоків в Амстердамі. Крім того, у низці будинків встановлено інтелектуальні лічильники енергії, а також передбачено стимули для тих, хто активно скорочує споживання енергії. Інші ініціативи включають гнучке вуличне освітлення (smart lighting), що дає змогу муніципалітетам контролювати яскравість вуличних ліхтарів, та інтелектуальне управління дорожнім рухом, де рух контролюється в режимі реального часу та інформація про поточний час руху певними дорогами транслюється, щоб дати змогу автомобілістам визначити найкращі маршрути [32].

Згідно з даними дослідження Smart Cities, проведеного Juniper Research у 2015 році, Барселона посідає перше місце у світі в рейтингу «розумних міст».

Щорічно в Барселоні проходить міжнародна конференція Smart City Expo World Congress, на якій влада найбільших міст, а також технологічні компанії презентують свої рішення у сфері розвитку «розумного міста». Барселона впроваджує «розумні» рішення для оптимізації транспортної системи, керування водопостачанням, енергозабезпеченням та відходами. Місто також розвиває «розумні» додатки та платформи для взаємодії з мешканцями та забезпечення їхньої участі в управлінні містом [33].

Копенгаген вважається одним з найбільш «розумних» міст в Європі. Воно активно впроваджує інноваційні технології для покращення транспортної системи, використання відновлювальних джерел енергії та стимулювання зелених ініціатив [36].

Англійське місто Мілтон-Кінс зробило спробу перетворити себе на «розумне місто». Наразі механізм для досягнення цієї мети – «МК: Розумна ініціатива» [30, 37], колаборація місцевої влади, бізнесу, академічних структур та організацій. Фокусом цієї ініціативи є раціоналізація використання енергії, води і транспорту та одночасне просування економічного зростання в місті. Центральне місце в цьому проєкті посідає ідея створення передового «МК Data Hub», який би підтримував збирання та управління величезною кількістю значущої для міської системи інформації з різних джерел. Це інформація про споживання електроенергії та витрати води, про транспортні потоки, супутникові дані, соціальні та економічні дані і краудсорсинг, отриманий через соціальні медіа або спеціалізовані додатки.

Сінгапур вважається одним з найбільш передових «розумних» міст у світі. Місто впроваджує технології для керування транспортною системою, водопостачанням, енергетикою та відходами. Воно також активно використовує цифрові рішення для забезпечення безпеки та моніторингу здоров'я мешканців [38].

Торонто запускає проєкт «Sidewalk Toronto», спільно з компанією Sidewalk Labs, для створення «розумного» району на прибережній території міста. Цей проєкт передбачає використання інноваційних технологій для оптимізації транспортної інфраструктури, енергетики, будівництва та житлової сфери [39].

У Києві також започатковано ініціативу Kyiv Smart City, метою якої є створення сприятливих умов для еволюції міста. У концепції закладено основні принципи інфраструктурного, технологічного та соціального розвитку міста, а також визначено напрямки трансформації міського простору [40]. На сьогодні в Києві реалізовано проєкт «Картка киянина», що є «ключем доступу» мешканців міста до інновацій, які впроваджуються в місті.

Місто Сантандер у Кантабрії, на півночі Іспанії, має 20 000 датчиків, що з'єднують будівлі, інфраструктуру, транспорт, мережі комунікації та пропонує фізичний простір для експериментів і перевірки функцій інтернету речей, таких як взаємодія й управління протоколами, технологічними пристроями й допоміжними службами, як-от виявлення, керування ідентифікацією та безпека [41]. У Сантандері датчиками контролюють рівні забруднення, шуму, дорожній рух і паркування.

Сідней активно впроваджує «розумне місто» у багатьох сферах, таких як транспорт, енергетика, охорона здоров'я та культура. Місто використовує інформаційні технології для оптимізації роботи громадського транспорту, впровадження «розумних» світлофорів, енергоефективного освітлення та системи моніторингу забруднення повітря [42].

Ці приклади свідчать про те, що концепція «розумне місто» (стратегічний підхід до розвитку міських територій, що базується на використанні інформаційних технологій та інноваційних підходів для покращення якості життя мешканців, ефективного управління ресурсами та інфраструктурою, а також створення стійких та екологічно чистих середовищ) широко використовується в усьому світі і має значний потенціал для створення стійких, ефективних та зручних міських середовищ. Наразі така концепція слабо використовується для розвитку українських міст, в основному, через високу вартість, хоча має величезний потенціал для них, особливо під час повоєнної відбудови.

Отже, задача проєктування та розроблення кіберфізичної системи «Розумне місто» є наразі актуальною для України.

1.2 Моніторинг якості атмосферного повітря у кіберфізичній системі «Розумне місто»

Забруднення повітря – це наявність у атмосферному повітрі різних шкідливих речовин, які можуть бути викинуті в результаті промислової, транспортної, агропромислової та інших людських діяльностей. Забруднення повітря є серйозною екологічною проблемою в нашому повсякденному житті, оскільки забруднене повітря може мати шкідливий вплив на здоров'я людини, тварин і рослин, а також на навколишнє середовище в цілому. Погіршення якості повітря негативно впливає на здоров'я населення та навколишнє середовище [43-45].

Забруднення повітря може мати серйозні наслідки для здоров'я людей, включаючи захворювання дихальних шляхів, серцево-судинні захворювання, алергічні реакції та інші проблеми. Крім того, воно може мати шкідливий вплив на довкілля, призводячи до забруднення ґрунту, водоймищ та пошкодження екосистем. Для боротьби з забрудненням повітря необхідно впровадження ефективних заходів з обмеження викидів шкідливих речовин, використання екологічно чистих технологій та зелених рішень у всіх галузях господарства, а також збільшення обізнаності та освіти суспільства щодо проблеми забруднення повітря [46-48].

Основні джерела забруднення повітря [49, 50]:

1) промислові викиди – викиди з підприємств, заводів і фабрик, які включають у себе шкідливі речовини, такі як сірководень (H_2S), оксиди азоту (NO_x), сажу, вуглеводні, токсичні речовини та інші;

2) транспорт – викиди від автомобілів, літаків, суден і інших транспортних засобів, які використовують паливо, що містить шкідливі речовини; наприклад, автомобілі, вантажівки, автобуси, мотоцикли та інші транспортні засоби, що працюють на дизельному паливі або бензині, викидають в атмосферу оксиди азоту (NO_x), вуглеводні, вуглекислий газ (CO_2) та інші шкідливі речовини;

3) агропромислове виробництво – використання пестицидів, фунгіцидів та інших хімічних речовин у сільському господарстві, що може спричиняти викиди

шкідливих речовин у повітря; тваринництво може призводити до викидів аміаку та метану, які також можуть сприяти забрудненню повітря;

4) побутові джерела – викиди від домашніх опалювальних систем, камінів, печей, а також дим від сміттєвих полігонів; використання вугілля, дерева, газу або нафти для опалення будинків може викликати викиди оксидів вуглецю (CO і CO_2), а також інших шкідливих газів;

5) природні джерела – природні пожежі, під час яких викидається значна кількість сажі, диму та інших шкідливих речовин; виверження вулканів може викидати в атмосферу значні кількості попелу, пилу, газів і пари, таких як діоксид сірки (SO_2), діоксид азоту (NO_2), водяна пара (H_2O) та інші; пилові та пісчані бурі можуть переносити великі обсяги пилу, піску, попелу та інших часток у повітря, що може призводити до забруднення повітря; деякі природні процеси, такі як гниль органічної рослинності, викидають в атмосферу газу, наприклад, метан (CH_4), які також можуть впливати на якість повітря;

б) теплові електростанції – викиди вугільних або газових електростанцій містять великі обсяги вуглекислого газу, сірководню та інші шкідливі речовини.

Ці джерела можуть суттєво впливати на забруднення повітря, що впливає на здоров'я людей та навколишнє середовище.

Забруднення навколишнього середовища та якість повітря стають все більш важливими темами у сферах «Розумного міста» та державного регулювання [51-53].

Моніторинг якості атмосферного повітря в кіберфізичній системі «Розумне місто» є важливим процесом для визначення рівня забруднення та відслідковування змін у складі повітря, відіграє ключову роль у забезпеченні здоров'я та комфорту мешканців, а також у збереженні навколишнього середовища [54, 55].

Основні аспекти моніторингу якості повітря [56-60]:

1) вимірювання забруднювачів – вимірювання концентрацій різних забруднювачів у повітрі, таких як оксиди азоту (NO_x), оксиди сірки (SO_x), вуглеводні, сажа та інші;

2) розміщення датчиків моніторингу в різних точках міста або регіону для отримання репрезентативних даних про якість повітря в цих місцях;

3) аналіз даних – отримані дані аналізуються для визначення рівня забруднення повітря, ідентифікації джерел забруднення та оцінки їх впливу на здоров'я людей та довкілля;

4) публічна інформація – результати моніторингу повітряної якості надаються громадськості через спеціальні платформи, веб-сайти або мобільні додатки, що дозволяє громадянам отримувати інформацію про рівень забруднення та вживати необхідні заходи для захисту свого здоров'я;

5) подальші дії – на основі результатів моніторингу розробляються стратегії та заходи для зменшення рівня забруднення та покращення якості повітря, такі як впровадження екологічних технологій, регулювання викидів промислових підприємств та транспортних засобів, а також інші заходи для зменшення впливу на здоров'я і довкілля.

Моніторинг якості повітря є надзвичайно важливим з численних причин [61-63]:

1) охорона здоров'я – погана якість повітря може призводити до серйозних проблем зі здоров'ям, такими як захворювання дихальних шляхів, астма, серцево-судинні захворювання та навіть рак;

2) екологічне здоров'я – забруднення повітря може мати шкідливий вплив на рослини, тварин і екосистеми в цілому, порушуючи екологічну рівновагу та біорізноманіття;

3) якість життя – чисте повітря сприяє покращенню якості життя людей, забезпечуючи комфортне та безпечне середовище для проживання та праці;

4) економічні наслідки – забруднення повітря може призводити до економічних збитків через втрати продуктивності, зростання медичних витрат та втрати доходів від туризму та інших галузей;

5) публічне обговорення – моніторинг якості повітря надає громадськості об'єктивні дані про рівень забруднення, що сприяє публічному обговоренню та прийняттю ефективних заходів для зменшення впливу на здоров'я та довкілля;

б) подолання кризових ситуацій – моніторинг якості повітря допомагає вчасно виявляти кризові ситуації, такі як пожежі, промислові аварії або

надзвичайні події, що можуть призвести до загрози для здоров'я та безпеки населення; вчасне реагування на ці ситуації дозволяє вживати необхідні заходи для мінімізації негативного впливу на здоров'я та довкілля;

7) наукові дослідження – дані, зібрані в результаті моніторингу якості повітря, використовуються для проведення наукових досліджень щодо зв'язку між забрудненням повітря та різними видами захворювань; ці дослідження допомагають у розробці стратегій профілактики та лікування захворювань, а також у вдосконаленні екологічних стандартів та політики;

8) міжнародне співробітництво – моніторинг якості повітря є важливим елементом міжнародного співробітництва в галузі охорони довкілля та здоров'я; обмін даними та спільні програми моніторингу дозволяють країнам спільно вирішувати проблеми забруднення повітря та здійснювати координовану діяльність для зменшення його впливу.

Узагальнюючи, моніторинг якості повітря відіграє важливу роль у забезпеченні здоров'я людей, екологічної стійкості та сталого розвитку суспільства. В цілому, моніторинг якості повітря є ключовим інструментом для забезпечення здоров'я, безпеки та сталого розвитку суспільства, а також сприяє науковим дослідженням і міжнародному співробітництву в цій області [64].

Система моніторингу якості повітря в режимі реального часу допомагає відстежувати раптові зміни в атмосфері [6-8]. Вирішення проблем забруднення є одним з головних викликів, з якими стикаються міста в наш час, оскільки саме міста є основними джерелами викидів забруднюючих речовин, а також з іншого боку є територіями, де вплив забруднення на здоров'я людей (особливо на дихальні шляхи, серцево-судинну систему та нервову систему) є доволі значним.

Розглянемо відомі системи моніторингу якості повітря в режимі реального часу [65-67]:

1) AirVisual [68-70] – це інноваційна платформа моніторингу якості повітря, яка надає в реальному часі широкий спектр послуг для вимірювання, аналізу та спостереження за забрудненням повітря, зокрема, інформацію про якість повітря в різних регіонах світу, включаючи рівні забруднювачів та індекс якості повітря,

прогнози та поради для здоров'я; пропонує сенсори для внутрішнього та зовнішнього використання, які надають дані про якість повітря в реальному часі; система доступна через мобільні додатки та веб-сайт; платформа також надає прогнози якості повітря на майбутні дні, що дозволяє людям планувати свої дії та вибирати стратегії для захисту від забруднення повітря; AirVisual надає користувачам поради та рекомендації щодо захисту від забруднення повітря та збереження здоров'я, що допомагає зменшити негативний вплив забруднення повітря на організм; таким чином, система AirVisual є потужним інструментом для моніторингу якості повітря та сприяє підвищенню обізнаності громадськості про проблеми забруднення повітря, а також допомагає людям приймати обґрунтовані рішення для захисту свого здоров'я; вартість такого монітору якості повітря складає порядку 15000 грн;

2) PurpleAir [71-75] – це глобальна мережа моніторингу якості повітря, реалізована як мережа сенсорів, розташованих у різних частинах світу, яка надає дані про рівні забруднювачів у повітрі в реальному часі; ці дані можуть бути доступні через інтерактивну мапу на їхньому веб-сайті та в мобільному додатку; PurpleAir використовує два сенсори на кожному пристрої для вимірювання рівнів різних забруднювачів повітря, таких як PM2.5 та PM10, що дозволяє забезпечити більш точні дані про якість повітря; PurpleAir також зберігає історичні дані, що дозволяє користувачам відстежувати зміни в рівнях забруднення повітря протягом певного часу; PurpleAir надає користувачам можливість візуалізувати дані про якість повітря на мапі, де кожен сенсор позначений своїм місцем розташування; PurpleAir надає API для розробників, що дозволяє створювати додатки та сервіси, що використовують дані про якість повітря для різних цілей, включаючи розробку мобільних додатків та інтерактивних веб-сайтів; отже, система PurpleAir є важливим інструментом для моніторингу якості повітря, який допомагає громадянам та владі приймати обґрунтовані рішення для збереження здоров'я та зменшення негативного впливу забруднення повітря на навколишнє середовище; вартість такого монітору якості повітря складає порядку 12000 грн;

3) IQAir AirVisual Pro [76, 77] – пристрій, який надає інформацію про рівні забруднювачів у повітрі в реальному часі, включаючи частки PM2.5, PM10, оксид азоту та інші; інформація відображається на дисплеї пристрою, а також може бути синхронізована з мобільним додатком; платформа може надсилати користувачам сповіщення про небезпечні рівні забруднень повітря, а також надавати поради щодо заходів для зменшення впливу цих забруднень на здоров'я; IQAir AirVisual Pro надає можливість візуалізувати дані про якість повітря на мапі, що дозволяє користувачам швидко оцінити рівень забруднення повітря у різних районах та виконати аналіз стану ситуації в різних регіонах; отже, IQAir AirVisual Pro – це важливий інструмент для моніторингу та контролю якості повітря, який допомагає громадянам, медичним установам та владі приймати обґрунтовані рішення для покращення якості повітря та захисту здоров'я громадян; вартість такого монітору якості повітря складає порядку 15000 грн;

4) Aeroqual Cloud [78-80] – система моніторингу, яка надає дані про якість повітря, включаючи рівні оксидів азоту, озону, часток PM2.5, PM10, NO2, SO2, O3 та інших забруднювачів в реальному часі, що дозволяє отримувати повну картину про якість повітря в конкретному регіоні; дані можна переглянути через веб-портал або мобільний додаток; платформа може автоматично надсилати сповіщення користувачам про виявлення небезпечних рівнів забруднень, а також надає можливість проводити аналіз даних та створювати звіти для подальшого використання; Aeroqual Cloud може бути інтегрована з іншими системами моніторингу або міськими інфраструктурами для створення комплексних рішень для контролю якості повітря та охорони здоров'я; отже, система Aeroqual Cloud є важливим інструментом для моніторингу та управління якістю повітря, яка допомагає містам, компаніям та громадянам забезпечити безпечне та здорове довкілля;

5) Foobot [81-83] – це домашній монітор якості повітря, який надає дані про рівні забруднювачів, такі як частки PM2.5, VOCs, CO2 та інші в реальному часі; дані можна переглядати через мобільний додаток або веб-портал; Foobot автоматично надсилає сповіщення користувачам про виявлення небезпечних рівнів

забруднень і надає поради щодо того, як покращити якість повітря; Foobot має зручний інтерфейс користувача, який дозволяє відслідковувати тенденції якості повітря та приймати необхідні заходи для поліпшення довкілля; вартість такого монітору якості повітря складає порядку 64000 грн [82];

6) EPA AirNow [84-87] – це система моніторингу якості повітря, розроблена Агентством з охорони навколишнього середовища США (EPA); вона надає інформацію про рівні забруднювачів у повітрі, такі як частки PM2.5, PM10, озон, оксид азоту та інші, для різних місць у Сполучених Штатах через веб-сайт і мобільний додаток; AirNow пропонує інтерактивну карту, на якій користувачі можуть відслідковувати рівень забруднення повітря у своєму районі, використовуючи кольорову шкалу індексу якості повітря; користувачі можуть підписатися на сповіщення про рівень забруднення повітря та отримувати поради щодо заходів безпеки та захисту здоров'я в разі високих рівнів забруднення; AirNow надає користувачам доступ до різноманітних інформаційних ресурсів про вплив забруднення повітря на здоров'я та рекомендації щодо зменшення впливу забруднення на навколишнє середовище та здоров'я;

7) Breezometer [88-90] – це платформа моніторингу якості повітря, яка надає дані про забруднення повітря на основі геолокації користувача; вона оцінює рівні різних забруднювачів та надає корисні поради для збереження здоров'я; Breezometer використовує розширені алгоритми та моделі для аналізу даних з різних джерел, включаючи мережі сенсорів, метеорологічні станції та інші джерела, щоб забезпечити користувачам найточнішу інформацію про якість повітря; система надає дані про рівень різних забруднювачів повітря, включаючи PM2.5, PM10, NO2, SO2, CO та O3, а також інші параметри, такі як температура, вологість та тиск; Breezometer має інтерактивну карту, на якій користувачі можуть переглядати рівень забруднення повітря у своєму районі в реальному часі та отримувати оновлення через мобільний додаток або веб-сайт; користувачі можуть підписатися на сповіщення про зміни в рівні забруднення повітря та отримувати поради щодо заходів безпеки та захисту здоров'я відповідно до поточної ситуації;

Breezometer надає користувачам можливість глибокого аналізу даних, включаючи звіти про тривалість, інтенсивність та вплив забруднення повітря на здоров'я;

8) Atmotube [91, 92] – це переносний сенсор якості повітря, який можна прикріпити до сумки або ключів; він надає інформацію про рівні різних забруднювачів у повітрі, таких як PM2.5, VOCs, CO₂ та інших, а також про температуру та вологість через мобільний додаток; Atmotube надсилає користувачам сповіщення про зміни в якості повітря та надає поради щодо заходів безпеки та захисту здоров'я; Atmotube також має функцію спільноти, де користувачі можуть обмінюватися інформацією про якість повітря та досвідом використання пристрою; вартість такого монітору якості повітря складає порядку 8000 грн.

Системи моніторингу якості повітря в режимі реального часу дозволяють користувачам в режимі реального часу моніторити рівні забруднювачів у повітрі та вживати відповідних заходів для збереження здоров'я. Вони надають користувачам доступ до актуальної інформації про якість повітря в їхніх районах, що дозволяє їм уникати забруднених областей та приймати необхідні заходи для підтримки свого здоров'я. Такі системи є важливим інструментом для інформування громадськості про проблеми забруднення повітря та сприяють прийняттю ефективних заходів для зменшення впливу цього забруднення на здоров'я та довкілля.

Отже, моніторинг якості повітря в містах має вирішальне значення, оскільки він є попереднім і необхідним кроком для розробки та подальшого виконання заходів, спрямованих на зменшення забруднення з метою збереження здоров'я громадян [9].

Моніторинг якості повітря в кіберфізичній системі «Розумне місто» виконується завдяки розміщенню по всьому місту датчиків для вимірювання різних параметрів якості повітря, таких як вологість, температура, вміст пилу, в тому числі частинок PM2.5, PM10, радіаційний фон, забруднення оксидами азоту, сіркою, вуглецевими сполуками, парниковими газами типу CO, CO₂, NH₃, NO тощо. Дані з датчиків аналізуються та опрацьовуються, в результаті чого мешканцям міста можуть розсилатись сповіщення в разі сильного забруднення повітря та поради щодо захисту їх здоров'я [9-11].

1.3 Висновки. Постановка задачі

Моніторинг якості повітря в кіберфізичній системі «Розумне місто» виконуватиметься завдяки розміщенню по всьому місту датчиків для вимірювання різних параметрів якості повітря, таких як вологість, температура, вміст пилу, в тому числі частинок PM2.5, PM10, радіаційний фон, забруднення оксидами азоту, сіркою, вуглецевими сполуками, парниковими газами типу CO, CO₂, NH₃, NO тощо, а також інших шкідливих речовин. Дані з датчиків аналізуватимуться та опрацьовуватимуться, в результаті чого мешканцям міста можуть розсилатись сповіщення в разі сильного забруднення повітря та поради щодо захисту їх здоров'я.

Метою кваліфікаційної роботи є моніторинг якості атмосферного повітря, зокрема, автоматичний контроль за рівнем вологості, температури, вмісту пилу, в тому числі частинок PM2.5, PM10, радіаційного фону, забруднення оксидами азоту, сіркою, вуглецевими сполуками, парниковими газами типу CO, CO₂, NH₃, NO тощо, а також інших шкідливих речовин шляхом створення підсистеми моніторингу якості атмосферного повітря у кіберфізичній системі «Розумне місто».

Поставлена мета досягається розв'язанням таких основних *задач*:

- 1) аналіз відомих методів та рішень для моніторингу якості атмосферного повітря;
- 2) моделювання процесу моніторингу якості атмосферного повітря у кіберфізичній системі «Розумне місто»;
- 3) розроблення методу моніторингу якості атмосферного повітря;
- 4) розроблення архітектури підсистеми моніторингу якості атмосферного повітря кіберфізичної системи «Розумне місто»;
- 5) проведення експериментів із використанням розробленої підсистеми моніторингу якості атмосферного повітря кіберфізичної системи «Розумне місто».

Об'єктом дослідження є процес моніторингу якості атмосферного повітря у кіберфізичній системі «Розумне місто».

Предметом дослідження є метод та підсистема моніторингу якості атмосферного повітря у кіберфізичній системі «Розумне місто».

2 МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ МОНІТОРИНГУ ЯКОСТІ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ У КІБЕРФІЗИЧНІЙ СИСТЕМІ «РОЗУМНЕ МІСТО»

2.1 Вибір складових частин підсистеми моніторингу якості атмосферного повітря кіберфізичної системи «Розумне місто»

Будь-яка кіберфізична система, як і кожна її автономна підсистема, складається з трьох рівнів [93]. На нижньому рівні знаходяться датчики і сервоприводи (за потреби). На середньому рівні знаходиться контролер, який з'єднується із датчиками та сервоприводами. Верхній рівень визначається системою збору, моніторингу та керування даними кіберфізичної системи у реальному часі.

Таким чином, для розробки підсистеми кіберфізичної системи необхідно зробити вибір елементної бази, виходячи з її призначення, – підібрати необхідні датчики, обрати контролер і розробити сценарії та методи для збору, моніторингу та управління даними. Крім того, необхідно визначити стандарт передачі даних для забезпечення зв'язку між усіма компонентами підсистеми.

Як було визначено вище, підсистема моніторингу якості атмосферного повітря кіберфізичної системи «Розумне місто» здійснюватиме контроль за рівнем вологості, температури, вмісту пилу, в тому числі частинок PM2.5, PM10, радіаційного фону, забруднення оксидами азоту, сіркою, вуглецевими сполуками, парниковими газами типу CO, CO₂, NH₃, NO тощо.

Датчики вологості та температури атмосферного повітря вимірюють кількість водяної пари в повітрі, а також температуру повітря. Вони допомагають визначити вологість та температуру навколишнього середовища, що може бути важливою характеристикою для здоров'я та комфорту людей. Ці датчики можуть використовуватись у різноманітних сферах, включаючи сільське господарство, медицину, будівництво та промисловість. Типові датчики вологості атмосферного повітря використовують різноманітні технології для вимірювання вологості (резистивні, ємнісні, конденсаційні або оптичні методи).

До популярних моделей датчиків вологості та температури атмосферного повітря належать:

1) DHT11 – дешевий і популярний цифровий датчик, який здатний вимірювати вологість і температуру; вимірює вологість повітря з точністю близько $\pm 5\%$ відносної вологості, температуру – з точністю близько $\pm 2^\circ\text{C}$; має цифровий інтерфейс, що робить його досить легким у використанні з багатьма мікроконтролерами та одноплатними комп'ютерами; однією з головних переваг DHT11 є його низька вартість, що робить його доступним для багатьох проєктів; часто використовується в проєктах з кліматичного контролю, метеостанціях та інших застосуваннях, де потрібно вимірювати вологість та температуру повітря; ціна датчика зазвичай коливається в діапазоні від декількох доларів до кількох десятків доларів за один датчик;

2) DHT22 (AM2302) – датчик, який також вимірює вологість і температуру, але має кращу точність порівняно з DHT11; точність вимірювання вологості становить приблизно $\pm 2\text{-}5\%$ відносної вологості, температури – з точністю приблизно $\pm 0,5^\circ\text{C}$; також має цифровий інтерфейс, що робить його сумісним з багатьма мікроконтролерами та одноплатними комп'ютерами; працює швидше і має кращу стійкість до перешкод, ніж DHT11, проте має і вищу вартість; також широко використовується в проєктах з моніторингу клімату, в метеостанціях і системах контролю навколишнього середовища; ціна датчика зазвичай коливається в діапазоні від декількох доларів до кількох десятків доларів за один датчик;

3) BME280 – це високоточний інтегрований датчик, який вимірює температуру, вологість і атмосферний тиск; точність вимірювання вологості становить $\pm 3\%$, температури – $\pm 1^\circ\text{C}$; він здатний працювати в широкому діапазоні температур і вологості; працює в широкому діапазоні температур, що робить його відмінним вибором для застосувань у різних кліматичних умовах; має цифровий інтерфейс з можливістю зчитування даних через шину I2C або SPI, що робить його сумісним з багатьма мікроконтролерами та одноплатними комп'ютерами; має компактний розмір, що дозволяє легко використовувати його в різних пристроях і системах; є потужним інструментом для вимірювання параметрів атмосфери і

знаходить застосування в різних галузях, включаючи метеорологію, системи контролю навколишнього середовища тощо; ціна датчика зазвичай коливається від 3 до 15 доларів за один датчик;

4) SHT1x / SHT3x – датчики вологості і температури, які виробляються компанією Sensirion, мають високу точність та стабільність вимірювань; точність вимірювання вологості становить приблизно $\pm 3.5\%$ в SHT1x та $\pm 2\%$ в SHT3x; точність вимірювання температури становить $\pm 0,5^\circ\text{C}$ в SHT1x та $\pm 0,2^\circ\text{C}$ в SHT3x; мають цифровий інтерфейс, що полегшує зчитування даних і підключення до мікроконтролерів або інших пристроїв; ефективно використовують енергію, що робить їх відмінним вибором для пристроїв з обмеженим джерелом живлення; можуть працювати в широкому діапазоні напруги живлення, що забезпечує їх сумісність з різними типами систем живлення; ці датчики широко використовуються в метеорології, автоматизації промислових процесів, системах контролю клімату тощо завдяки їхній надійності, точності та зручності в застосуванні; зазвичай ці датчики коштують від приблизно 5 до 20 доларів за один пристрій;

5) HTU21D – цифровий датчик вологості, який має високу точність і широкий діапазон вимірювань; точність вимірювання вологості становить приблизно $\pm 3\%$, температури – приблизно $\pm 0.3^\circ\text{C}$; датчик може працювати в широкому діапазоні температур, зазвичай від -40°C до $+125^\circ\text{C}$; має високий діапазон вимірювання вологості, зазвичай від 0% до 100%, що дозволяє застосовувати його в різноманітних умовах; має простий цифровий інтерфейс зв'язку, такий як I2C або SPI, що спрощує інтеграцію з мікроконтролерами та іншими пристроями; споживає дуже мало енергії, що робить його ідеальним для застосувань, де важлива енергоефективність; датчик HTU21D є досить універсальним і може бути використаний у різних пристроях та застосуваннях, де вимагається точне вимірювання температури та вологості; зазвичай вартість цього датчика становить приблизно від 5 до 15 доларів за один пристрій;

6) Si7021 – високоточний інтегрований цифровий датчик вологості і температури з високою точністю і низьким споживанням енергії; має точність

вимірювання температури приблизно $\pm 0,4^{\circ}\text{C}$ і вологості приблизно $\pm 3\%$; здатний працювати в широкому діапазоні температур, що зазвичай становить від -40°C до $+125^{\circ}\text{C}$; має високу стабільність вимірювань і водночас витрачає дуже мало енергії, що дозволяє йому бути ефективним для застосувань, де важлива енергоефективність; має цифровий інтерфейс зв'язку, такий як I2C, що робить його легким у використанні та інтеграції з мікроконтролерами та іншими пристроями; має компактні розміри і малу масу, що дозволяє його використовувати в різних застосуваннях; датчик Si7021 є надійним і ефективним рішенням для вимірювання температури та вологості у різних умовах, таких як промислові, побутові та наукові застосування; зазвичай вартість цього датчика становить приблизно від 2 до 10 доларів за один пристрій;

7) AM2320 – цифровий датчик вологості і температури з широким діапазоном вимірювань; точність вимірювання температури приблизно $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ і вологості приблизно $\pm 3\%$; має цифровий інтерфейс зв'язку, такий як I2C, що робить його легким у використанні з мікроконтролерами та іншими пристроями; має низьке споживання енергії, що робить його ефективним для застосувань, де важлива енергоефективність; має компактний розмір, що дозволяє легко інтегрувати його в різні пристрої і системи; датчик AM2320 є надійним і корисним інструментом для вимірювання температури та вологості в різних застосуваннях, від домашніх проектів до промислових систем моніторингу; зазвичай вартість цього датчика становить приблизно від 5 до 15 доларів за один пристрій;

8) SHT20 – недорогий цифровий датчик вологості, який працює від -40°C до $+125^{\circ}\text{C}$ і має високу точність; точність вимірювання температури приблизно $\pm 0,3^{\circ}\text{C}$ і вологості приблизно $\pm 3\%$; може працювати в умовах з високою вологістю та екстремальними температурами, що робить його корисним для широкого спектру застосувань, включаючи метеорологічні станції, системи контролю середовища та інші вимогливі додатки; датчик SHT20 також відрізняється компактним розміром, низьким споживанням енергії та простотою використання; його можна легко інтегрувати в різноманітні пристрої та системи завдяки доступним інтерфейсам зв'язку та гнучким налаштуванням параметрів роботи; такий датчик є важливим

інструментом для забезпечення високої якості моніторингу вологості в атмосферному повітрі в різних областях застосування; зазвичай вартість одного датчика SHT20 становить приблизно від 5 до 20 доларів;

9) HTS221 – компактний цифровий датчик вологості та температури, який має низьку вартість та високу точність; для вимірювання температури точність може бути в межах $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$, а для вимірювання вологості – в межах $\pm 3\%$; його особливість полягає у високій точності та стабільності вимірювань, незалежно від зміни умов оточуючого середовища; крім того, він має низьке споживання енергії, що робить його ідеальним вибором для мобільних пристроїв та систем з обмеженим живленням; надійність і простота використання роблять його популярним серед розробників у галузі IoT, вимірювальних систем та інших сфер, де важлива точна інформація про вологість та температуру навколишнього середовища; зазвичай вартість одного датчика HTS221 становить приблизно від 1 до 5 доларів;

10) HS1101 – аналоговий датчик вологості, який використовується у багатьох застосуваннях і має простий дизайн; використовує п'єзоелектричний керамічний елемент, що змінює свою ємність в залежності від вологості, що дозволяє вимірювати рівень вологості; цей датчик має досить широкий діапазон вимірювань та може бути використаний у різних додатках, де необхідно вимірювати вологість; точність цього датчика може коливатися в залежності від умов використання та калібрування, але в цілому він зазвичай надає достатньо точні вимірювання для багатьох застосувань; зазвичай вартість одного датчика HS1101 становить приблизно від 5 до 15 доларів.

Оскільки ціна проаналізованих датчиків приблизно однакова, то оберемо для нашої підсистеми датчик SHT20 (рис. 2.1), який має високу точність, а також працює на екстремальних вологості та температурах, що важливо, враховуючи його вуличне використання у підсистемі моніторингу якості атмосферного повітря кіберфізичної системи «Розумне місто».



Рисунок 2.1 – Датчик температури та вологості повітря SHT20 [94]

Датчики вмісту пилу у повітрі використовуються для вимірювання концентрації твердих частинок (пилу, диму, дрібних часток) у повітрі. Виділяють лазерні датчики пилу, які використовують лазер для вимірювання розміру та кількості частинок у повітрі; оптичні датчики пилу, які використовують фотодіоди або фототранзистори для вимірювання розсіяного світла пилу; електронні датчики пилу, які використовуються для вимірювання електричного заряду, який виникає при взаємодії пилових частинок з електричним полем; датчики маси пилу, які вимірюють масу частинок пилу, що осідають на фільтрі, та аналізують її для визначення концентрації; датчики розміру пилу, які вимірюють розмір частинок пилу, присутніх у повітрі, що допомагає в класифікації різних типів забруднення.

До популярних моделей датчиків вмісту пилу у повітрі належать:

1) Plantower PMS5003 вимірює частинки розміром від 2,5 мікрометрів і до 10 мікрометрів та має високу точність; відомий своєю високою точністю та надійністю; може бути використаний у різних застосунках, таких як моніторинг якості повітря в містах, вимірювання пилу у виробничих приміщеннях або вдома; вимірює концентрацію частинок PM2.5 та PM10; має компактний розмір та

зручний у використанні; забезпечує передачу даних через різні інтерфейси, такі як UART або USB; зазвичай використовується у сполученні з мікроконтролерами або мікропроцесорами для збору та аналізу даних про якість повітря; це важливий інструмент для моніторингу середовища та контролю забруднення повітря; зазвичай цей датчик можна придбати в діапазоні від приблизно 20 до 50 доларів;

2) Nova SDS011 також вимірює частинки розміром від 2,5 мікрметрів та до 10 мікрметрів і здатний вимірювати концентрацію пилу в реальному часі; здатний вимірювати частинки PM2.5 та PM10; широко використовується для моніторингу якості повітря в міських середовищах, промислових зонах та вдома; має компактний розмір та може працювати з різними мікроконтролерами або комп'ютерами через інтерфейс UART або USB; ефективно використовує енергію, що робить його економічним у використанні; може надавати дані про концентрацію пилу у реальному часі, що дозволяє оперативно реагувати на забруднення повітря; є важливим інструментом для моніторингу якості повітря, який допомагає виявляти та контролювати забруднення у повітряному середовищі; зазвичай цей датчик можна придбати за приблизно 20-40 доларів;

3) Sharp GP2Y1010AU0F – дешевий оптичний датчик, який вимірює концентрацію пилу у повітрі, базуючись на засвіченні та розсіюванні світла; має вбудований інфрачервоний світлодіод і фотодіод, які взаємодіють з частинками пилу, що проходять через датчик; використовується для вимірювання концентрації частинок пилу розміром більше 0,5 мікрметра; має високу чутливість до пилових частинок, що дозволяє вимірювати навіть дуже низькі концентрації пилу у повітрі; має низьке енергоспоживання, що робить його ефективним у використанні в пристроях з обмеженим джерелом енергії; має компактний розмір і простий інтерфейс взаємодії, що робить його легко інтегрованим в різноманітні пристрої; відомий своєю надійністю та довговічністю, що робить його популярним в різних додатках для моніторингу якості повітря; ціна датчика Sharp GP2Y1010AU0F зазвичай коливається від 10 до 20 доларів;

4) Honeywell HPMА115S0-XXX вимірює концентрацію пилу та його розмір від 0,3 до 10 мікрметрів; використовує лазерне освітлення для точного визначення

розміру і кількості пилових частинок у повітрі; має високу чутливість до пилових частинок різного розміру, що дозволяє виявляти навіть дуже малі концентрації пилу у повітрі; охоплює широкий діапазон розмірів частинок пилу, вимірюючи відносно великі та дуже малі частинки; має компактний дизайн, що дозволяє легко інтегрувати його в різні пристрої та системи моніторингу якості повітря; відомий своєю ефективністю щодо енергоспоживання, що дозволяє йому працювати на тривалий термін від різних джерел енергії; ціна становить порядку 20-30 доларів;

5) Aeroqual Dust Sentry PM10/PM2.5 вимірює концентрацію пилу різних розмірів, зокрема частинок PM10 та PM2.5, та індекс якості повітря; забезпечує високу точність вимірювань концентрації пилу в повітрі, що дозволяє отримувати достовірні дані про забруднення; має високу чутливість до навіть невеликих змін у рівнях пилу в повітрі, що робить його ефективним для раннього виявлення забруднень; відомий своєю надійністю та стійкістю до різних умов експлуатації, що дозволяє використовувати його у різних середовищах; простий у встановленні та експлуатації, що робить його зручним для використання в різних місцях; зазвичай вартість цього датчика становить кілька тисяч доларів;

6) Alphasense OPC-N3 вимірює концентрацію пилу розміром від 0,38 до 17 мікрометрів і може передавати дані через інтерфейс RS485 або USB; забезпечує високу точність вимірювань концентрації частинок в повітрі, що дозволяє отримувати достовірні дані про забруднення; охоплює широкий діапазон розмірів частинок, вимірюючи як більші, так і менші частинки (від PM1 до PM10); має високу чутливість до навіть невеликих змін у рівнях частинок в повітрі, що робить його ефективним для раннього виявлення забруднень; відомий своєю надійністю та стійкістю до різних умов експлуатації, що дозволяє використовувати його у різних середовищах; простий у встановленні та експлуатації, що робить його зручним для використання в різних місцях; ціна за одиницю OPC-N3 може бути в діапазоні від кількох сотень доларів;

7) PurpleAir PA-II має два лазерні датчики і може вимірювати концентрацію частинок PM2.5 та PM10; оснащений двома лазерними сенсорами, які вимірюють концентрацію частинок PM2.5 та PM10 в повітрі; має можливість передавати дані

бездротово через Wi-Fi, що дозволяє зручно збирати та відображати дані на веб-серверах; надає дані про концентрацію частинок у повітрі в режимі реального часу, що дозволяє швидко виявляти забруднення та вживати відповідні заходи; зазвичай ціна за одиницю може бути від приблизно 200 до 300 доларів.

Оскільки ціна проаналізованих датчиків суттєво різниться, то оберемо для нашої підсистеми моніторингу якості атмосферного повітря кіберфізичної системи «Розумне місто» датчик Nova SDS011 (рис. 2.2), який має високу точність, а також вимірює концентрацію частинок PM2.5, PM10 дрібнодисперсного пилу, які є однією з найбільш шкідливих форм забруднення повітря.



Рисунок 2.2 – Високоточний лазерний датчик Nova PM SDS011 [95]

Датчики радіаційного фону використовуються для вимірювання рівня радіації у навколишньому середовищі. Ціни на датчики радіаційного фону можуть варіюватися від кількох доларів до сотень доларів в залежності від моделі, функцій та виробника. Розглянемо найвідоміші моделі:

1) SBM-20 – один з популярних газонаповнених датчиків, який може вимірювати рівень гамма-випромінювання; використовується для вимірювання рівня радіації в навколишньому середовищі; ціна коливається від кількох десятків до сотні доларів;

2) Geiger-Muller (GM) використовують газонаповнену трубку для виявлення й вимірювання радіації; використовується для виявлення та вимірювання рівня іонізуючого випромінювання в навколишньому середовищі; базується на принципі роботи геігерівської трубки, яка відповідає за реєстрацію частинок радіації; вартість може становити до кількох сотень доларів;

3) Scintillation Detectors використовуються для вимірювання рівня радіації за допомогою виявлення світла, яке виділяється при взаємодії радіації з сцинтиляційним матеріалом; вартість може бути від кількох сотень до кількох тисяч доларів;

4) Solid-State Detectors використовують напівпровідникові матеріали для вимірювання радіації, такі як кремній або германій; використовують напівпровідникові матеріали, такі як кремній або германій, для детектування взаємодії частинок випромінювання з активною областю детектора; вартість може бути від кількох сотень до кількох тисяч доларів;

5) Dosimeters використовуються для вимірювання сумарної дози отриманої радіації протягом певного періоду часу; можуть бути використані як для моніторингу рівня опромінення людей, так і для вимірювання рівня опромінення навколишнього середовища; вартість може бути від декількох десятків до кількох сотень доларів;

6) Radex RD1503 вимірює рівень гамма-, бета- та рентгенівської радіації і має портативний дизайн; компактний дозиметр-радіометр, який використовується для вимірювання рівня радіації; призначений для виявлення рівня радіації β (бета), γ

(гамма) і X-випромінювання; має портативний дизайн і може бути використаний для моніторингу рівня радіації в навколишньому середовищі; ціна може становити від десятків до сотень доларів;

7) Inspector Alert V2 – портативний дозиметр-радіометр, який вимірює рівень гамма-, бета- та рентгенівської радіації; призначений для вимірювання рівня радіації в навколишньому середовищі; має великий діапазон вимірювання та може використовуватися для моніторингу навколишнього середовища; ціна може варіюватися від кількох сотень до кількох тисяч доларів;

8) Soeks Quantum вимірює рівень гамма-, бета- та рентгенівської радіації та має можливість зберігання даних для подальшого аналізу; це портативний дозиметр і детектор радіації, який призначений для вимірювання рівня радіації в навколишньому середовищі; має можливість вимірювати рівень радіації в харчових продуктах, воді, ґрунті та інших матеріалах; є компактним і легким пристроєм, який може бути використаний як для професійних, так і для особистих потреб; зазвичай вартість такого типу детекторів радіації становить від кількох сотень до кількох тисяч доларів;

9) Gamma-Scout – портативний дозиметр-радіометр, який вимірює рівень гамма-, бета- та рентгенівської радіації та має компактний дизайн; може вимірювати рівні радіації від декількох десятків мкЗв/год до кількох десятків мЗв/год; точність вимірювань також може варіюватися, але зазвичай вона становить від $\pm 10\%$ до $\pm 20\%$ від вимірюваного значення; зазвичай вартість такого типу датчиків радіації коливається від кількох сотень до кількох тисяч доларів.

Враховуючи особливості та призначення підсистеми моніторингу якості атмосферного повітря кіберфізичної системи «Розумне місто», оберемо для її реалізації датчик Radex RD1503 (рис. 2.3), який є компактним і відносно недорогим.



Рисунок 2.3 – Датчик радіаційного фону Radex RD1503 [96]

Датчики для вимірювання рівнів оксидів азоту (NO_x) у повітрі можуть бути різних типів і мати різні принципи роботи. Електрохімічні датчики використовують електрохімічні реакції для вимірювання концентрації NO та NO_2 у повітрі, виробляють електричний сигнал, який змінюється в залежності від концентрації NO_x . Оптичні датчики використовують оптичні методи для вимірювання концентрації NO_x у повітрі, такі як фотометрія або лазерна абсорбція; можуть бути високоточними, але водночас дорогими. Металоксидні напівпровідникові датчики використовують зміни в опорі металоксидних напівпровідників при контакті з NO_x ; можуть бути дешевими та компактними, але їхні вимірювання можуть бути менш точними порівняно з іншими типами датчиків. Біохімічні датчики використовують біологічні методи, такі як мікроорганізми або ензими, для

вимірювання концентрації NO_x у повітрі; можуть бути менш точними, але ефективними для вимірювання на довготривалій термін. Камери з іонізаційним детектором використовуються для вимірювання загальної радіації або гамма-випромінювання у повітрі, яке може бути пов'язане з діагностикою радіоактивного забруднення. Датчики на основі полімерних матеріалів використовують особливі полімерні матеріали, які реагують з NO_x у повітрі, змінюючи свої електричні властивості; можуть бути дешевими і компактними, але їхні вимірювання можуть бути менш точними.

Розглянемо моделі датчиків для вимірювання рівнів оксидів азоту (NO_x) у повітрі:

1) Alphasense NO₂-B43F – електрохімічний датчик від Alphasense, спеціально призначений для вимірювання рівня діоксиду азоту NO₂ у повітрі; діапазон вимірювання – зазвичай від 0 до 20 або 50 ppm; точність – до ±10% від зчитаних значень; ціна датчика може становити від кількох десятків до кількох сотень доларів;

2) City Technology 4-Electrode NO₂ Sensor – електрохімічний датчик, який може вимірювати рівні NO₂ у повітрі; діапазон вимірювання – зазвичай від 0 до 20 або 50 ppm; точність – до ±10% від зчитаних значень; зазвичай вартість може коливатися від кількох десятків до кількох сотень доларів;

3) Winsen NO₂-M43 – датчик газових сенсорів від компанії Winsen, який призначений для вимірювання NO₂; діапазон вимірювання – зазвичай від 0 до 20 або 50 ppm; точність – до ±10% від зчитаних значень; зазвичай вартість цього датчика коливається від декількох десятків до кількох сотень доларів;

4) Figaro TGS 2600 – напівпровідниковий датчик, який може виявляти оксиди азоту в повітрі; дозволяє вимірювати зміни рівнів NO_x в реальному часі; діапазон вимірювання – зазвичай від 0 до 20 або 50 ppm; чутливість зазвичай залежить від концентрації NO_x та умов довкілля, в яких відбувається вимірювання; зазвичай цей датчик коштує від кількох десятків до кількох сотень доларів;

5) Dynament NO₂ MiCS-2710 – напівпровідниковий датчик від Dynament, призначений для вимірювання NO₂; дозволяє вимірювати зміни рівня NO₂ в

реальному часі; діапазон вимірювання – зазвичай від 0 до 10 або 20 ppm; чутливість зазвичай залежить від концентрації NO₂ та умов довкілля, в яких відбувається вимірювання; зазвичай ціна цього датчика становить від кількох десятків до сотень доларів;

6) Bosch NO_x-Sensor UREA – датчик від Bosch, який призначений для вимірювання рівнів NO_x, зокрема, для контролю концентрації NO_x у відпрацьованих вихлопних газах дизельних двигунів післяпродажних систем та систем селективної каталітичної редукції; дозволяє вимірювати зміни рівнів NO_x в реальному часі; діапазон вимірювання – зазвичай від 0 до 500 ppm; добре адаптований для вимірювання низьких рівнів NO_x у відпрацьованих вихлопних газах; вартість цього датчика може бути від кількох сотень до кількох тисяч доларів;

7) Spec Sensors NO₂ – електрохімічний датчик від Spec Sensors, спеціально розроблений для вимірювання NO₂; дозволяє вимірювати зміни рівня NO₂ в реальному часі; діапазон вимірювання – зазвичай від 0 до 50 ppm; висока чутливість до навіть низьких концентрацій NO₂;

8) SGX Sensortech MiCS-4514 – комбінований датчик, який може вимірювати як NO₂, так і CO, а також вуглеводні (CH₄, C₂H₆) в повітрі; діапазон вимірювання NO_x - зазвичай від декількох ppb до кількох ppm; висока чутливість та достатня точність для вимірювання рівнів NO_x та вуглеводнів у повітрі.

Враховуючи особливості та призначення підсистеми моніторингу якості атмосферного повітря кіберфізичної системи «Розумне місто», оберемо для її реалізації датчик Figaro TGS 2600 (рис. 2.4), який є відносно недорогим і дозволяє вимірювати рівні різних оксидів азоту NO_x.



Рисунок 2.4 – Датчик Figaro TGS 2600 для вимірювання рівнів оксидів азоту (NO_x) у повітрі [97]

Датчики для вимірювання рівня сірки у повітрі можуть бути різних типів і мати різні принципи роботи. Газові сенсори з сіркооксиду (SO_x) використовуються для вимірювання сіркооксидів у повітрі, таких як SO₂ (діоксид сірки) і SO₃ (триоксид сірки); здатні виявляти навіть низькі концентрації сірки і використовуються у моніторингових системах та аналізаторах якості повітря. Електрохімічні сенсори сірки (SO_x) використовують електрохімічні методи для виявлення газових вмісту сірки в атмосферному повітрі; часто використовуються в портативних пристроях для вимірювання рівня сірки навколишнього середовища. Оптичні сенсори сірки (SO_x) вимірюють рівень сірки, використовуючи оптичні методи, такі як абсорбція світла чи флуоресценція, для виявлення присутності SO₂ у повітрі. Комбіновані сенсори можуть вимірювати рівень різних забруднювачів повітря, включаючи сірку, у поєднанні з іншими газами, такими як вуглеводні тощо.

Оскільки підсистема моніторингу якості атмосферного повітря кіберфізичної системи «Розумне місто» повинна виконувати моніторинг забруднення повітря не тільки сіркою, але й вуглецевими сполуками, відтак розглянемо моделі комбінованих датчиків для вимірювання рівня сірки та вуглеводнів у повітрі:

1) City Technology 4-Series – ці датчики мають різні конфігурації, що дозволяє вимірювати рівень сірководню (H_2S) та різні види вуглеводнів, такі як метан (CH_4) та пропан (C_3H_8); ці датчики відомі своєю високою чутливістю та надійністю вимірювань; використовуються у різних застосунках, таких як моніторинг якості повітря, промисловий контроль, безпека та охорона довкілля; зазвичай мають компактний дизайн, що робить їх легко встановлюваними та зручними у використанні;

2) Alphasense COH-A2 – цей датчик вимірює рівень вуглеводнів (COH), включаючи метан, пропан та інші; має високу чутливість та широкий діапазон вимірювань, що дозволяє ефективно виявляти навіть низькі концентрації забруднювачів;

3) Dynament MiniPID2 – цей датчик використовує технологію фотоіонізації для вимірювання рівня різних видів органічних газів, включаючи вуглеводні; є високочутливим і точним пристроєм, що забезпечує широкий діапазон вимірювань і низький рівень шуму, що робить його ідеальним для застосування у вимірюванні якості повітря у промислових, медичних та інших сферах;

4) SGX Sensortech MiCS-5524 – цей датчик спеціалізується на вимірюванні рівнів оксидів сірки та оксидів азоту, а також на низьких рівнях вуглеводнів; відомий своєю високою чутливістю та надійністю; може бути використаний в різноманітних застосуваннях, включаючи вимірювання якості повітря у виробничих приміщеннях, медичних установах та інших місцях, де необхідно моніторити рівень газів у навколишньому середовищі;

5) Aeroqual Series 500 здатний вимірювати рівні сірководню (H_2S), оксиду сірки (SO_2), а також інших забруднювачів; забезпечує швидке та точне вимірювання та має можливість підключення до мережі для моніторингу в режимі реального часу; має високу точність та надійність у вимірюванні, а також може працювати в різних умовах середовища; часто використовується для моніторингу якості повітря у міських середовищах, промислових зонах, а також для наукових досліджень та моніторингу забруднення навколишнього середовища; його висока

чутливість і широкий спектр функцій робить його корисним інструментом для багатьох додатків, де необхідно точно вимірювати рівень різних газів у повітрі;

б) Teledyne API T640 – аналізатор газів, який забезпечує вимірювання рівнів оксидів сірки, вуглеводнів та інших газових забруднювачів; є компактним та ефективним пристроєм для моніторингу якості повітря; має високу точність та чутливість у вимірюванні, що робить його ідеальним для використання в моніторингових системах для контролю якості повітря у міських та промислових середовищах, а також у наукових дослідженнях; датчик Teledyne API T640 дозволяє здійснювати надійне та точне вимірювання рівнів газів у повітрі, що робить його важливим інструментом для контролю та управління забрудненням навколишнього середовища;

7) Thermo Fisher Scientific 42iLS – аналізатор газів, призначений для вимірювання рівнів сірководню та вуглеводнів у атмосферному повітрі; він має високу точність та надійність вимірювань; забезпечує високу точність та стабільність вимірювань, що робить його важливим інструментом для вивчення впливу забруднювачів на навколишнє середовище та здоров'я людей; датчик Thermo Fisher Scientific 42iLS може бути використаний як в самостійних системах моніторингу, так і в складі комплексних мереж моніторингу якості повітря;

8) Horiba APDA-372 – аналізатор газів, здатний вимірювати рівні оксидів сірки та вуглеводнів, а також інших газових забруднювачів; має компактний дизайн та може бути легко встановлений для моніторингу в різних умовах; має високу точність та чутливість, що дозволяє виявляти навіть дуже низькі рівні забруднення; датчик Horiba APDA-372 може бути використаний як в самостійних моніторингових системах, так і в складі мереж моніторингу якості повітря для надання даних про забруднення повітря та його вплив на здоров'я людей і навколишнє середовище.

Враховуючи функціональність датчиків та потреби підсистеми моніторингу якості атмосферного повітря кіберфізичної системи «Розумне місто», оберемо для її проектування датчик Horiba APDA-372 (рис. 2.5).



Рисунок 2.5 – Датчик Horiba APDA-372 для вимірювання рівнів оксидів сірки та вуглеводнів у повітрі [98]

Датчики для вимірювання рівня парникових газів у повітрі можуть бути різних типів і мати різні принципи роботи. NDIR (недисперсійний інфрачервоний) датчики вимірюють концентрацію певних газів, таких як CO₂, CH₄ та інші, використовуючи інфрачервоне випромінювання, що абсорбується цими газами. PID (фотіонізаційні детектори) вимірюють рівень різноманітних парникових газів, таких як летючі органічні сполуки (VOC), шляхом їх іонізації при експозиції до ультрафіолетового (UV) світла. Електрохімічні сенсори застосовуються для вимірювання конкретних газів, таких як CO₂ або NO₂, шляхом використання хімічних реакцій, які породжують струми, пропорційні концентрації газу. Датчики метану і діоксиду вуглецю можуть бути спеціалізовані для вимірювання конкретних парникових газів, таких як метан і CO₂, які є основними чинниками глобального потепління.

Розглянемо поширені моделі датчиків для вимірювання рівня парникових газів у повітрі:

- 1) Senseair виробляє широкий спектр датчиків для вимірювання CO₂ та інших газів, таких як CH₄ і NH₃;
- 2) EL-USB-CO – компактний датчик, який вимірює рівень CO₂ в повітрі; використовується переважно в офісних приміщеннях, школах і домогосподарствах;

3) Winsen ZPH01 – датчик, який вимірює рівень CO₂; використовується переважно в будинках, офісних приміщеннях і домогосподарствах;

4) Honeywell Zephyr HAF Series мають великий діапазон вимірювання для CO₂ та інших парникових газів типу CO, NH₃, NO тощо; як правило, встановлюються в системи вентиляції, щоб автоматично регулювати рівень парникових газів у повітрі

5) SGX Sensortech MiCS-VZ-86 вимірює рівень CO₂ та інших газів типу CO, NH₃, NO тощо і може бути використаний для контролю якості атмосферного повітря.

Враховуючи функціональність датчиків та потреби підсистеми моніторингу якості атмосферного повітря кіберфізичної системи «Розумне місто», оберемо для її проектування датчик SGX Sensortech MiCS-VZ-86 (рис. 2.6).

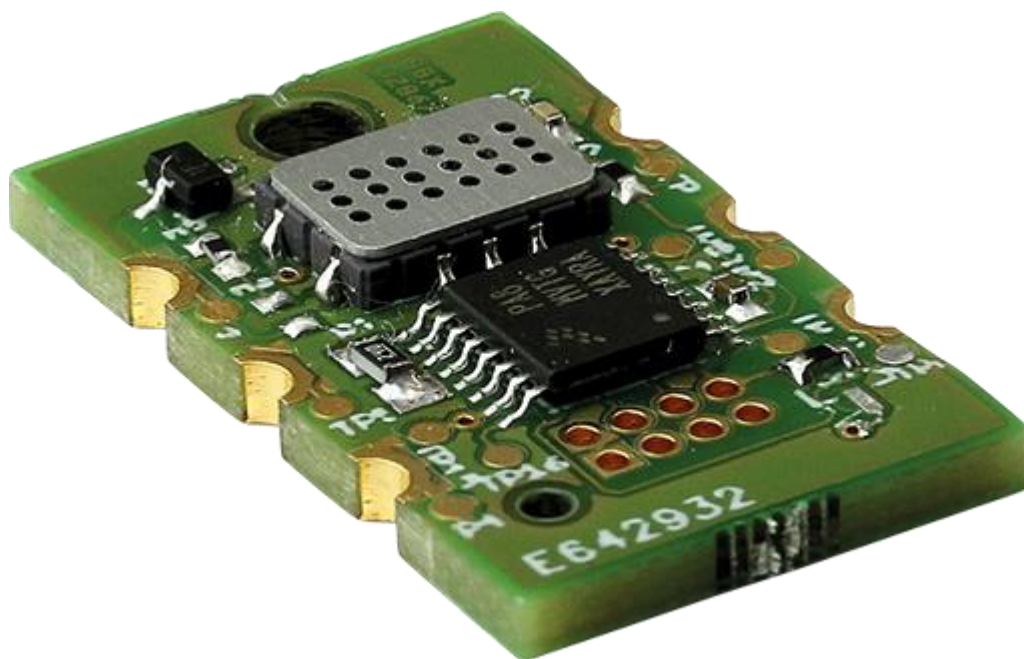


Рисунок 2.6 – Датчик SGX Sensortech MiCS-VZ-86 для вимірювання рівнів парникових газів у повітрі [99]

Оберемо тепер контролер для підсистеми моніторингу якості атмосферного повітря кіберфізичної системи «Розумне місто».

Контролер для підсистеми моніторингу якості атмосферного повітря в кіберфізичній системі «Розумне місто» повинен мати наступні характеристики і функції: збір даних (можливість збирати дані з різних датчиків для вимірювання рівня різних забруднювачів у повітрі); аналіз даних (вбудовані алгоритми для аналізу отриманих даних і визначення рівня забруднення повітря); керування (можливість керувати роботою датчиків, регулювати їх режими роботи та забезпечувати їхню синхронізацію); зв'язок (можливість передавати зібрані дані до центральної системи моніторингу через бездротові або дротові засоби зв'язку, такі як Wi-Fi, LoRa, NB-IoT, або Ethernet); інтеграція (сумісність з існуючими системами управління містом та іншими підсистемами кіберфізичної системи); безпека (забезпечення захисту від несанкціонованого доступу до даних та забезпечував конфіденційність та цілісність інформації); надійність і ефективність (стабільна робота в різних умовах середовища та ефективна робота всієї системи моніторингу якості атмосферного повітря). Ці характеристики дозволять контролеру ефективно здійснювати моніторинг та управління якістю повітря в межах «Розумного міста» для забезпечення здоров'я та комфорту мешканців.

Контролери для підсистеми моніторингу якості атмосферного повітря в кіберфізичній системі «Розумне місто» – це ключові компоненти, які відповідають за збір, обробку та передачу даних у реальному часі для різних систем та підсистем. Для моніторингу якості атмосферного повітря в "Розумному місті" можуть використовуватися різні типи контролерів:

1) IoT-контролери – базуються на технології Інтернету речей (IoT) і можуть бути підключені до різних типів сенсорів та датчиків, що вимірюють рівні різних забруднювачів у повітрі; зазвичай мають можливість зберігати та передавати дані у реальному часі через бездротові мережі, такі як Wi-Fi, LoRa, NB-IoT тощо;

2) центральні сервери для обробки та аналізу великих обсягів даних, зібраних від датчиків якості повітря; ці сервери можуть використовувати розподілені алгоритми обробки даних для отримання корисної інформації про якість повітря та приймати рішення на основі цих даних;

3) мережеві аналізатори можуть бути встановлені у вуличних локаціях або на будівлях для безпосереднього вимірювання рівнів забруднювачів у повітрі; вони зазвичай мають вбудовані сенсори та можуть передавати дані через кабельні мережі або бездротові зв'язки;

4) хмарні платформи для зберігання, аналізу та візуалізації даних з контролерів, які забезпечують можливість доступу до даних з будь-якого місця та можуть інтегруватися з іншими системами управління містом;

5) мобільні додатки для моніторингу якості повітря, які можуть відображати дані з контролерів у реальному часі та надавати користувачам різноманітні сервіси та рекомендації.

Для проектування середнього рівня підсистеми моніторингу якості атмосферного повітря в кіберфізичній системі «Розумне місто» оберемо IoT-контролери, до яких будуть підключатись обрані вище датчики різних типів, що вимірюють рівні різних забруднювачів у повітрі. Розглянемо популярні моделі IoT-контролерів:

1) Raspberry Pi – одна з найпоширеніших і доступних платформ для розробки IoT-проектів; має широкий функціонал і може використовуватися для збору, аналізу та передачі даних про середовище міста; характеристики Raspberry Pi 4 Model B: процесор – 1,5 ГГц 64-бітовий чотирьохядерний ARM Cortex-A72; пам'ять – 2, 4 або 8 ГБ LPDDR4 RAM (залежно від моделі); з'єднання – 2 порти USB 3.0, 2 порти USB 2.0, 2 порти micro-HDMI, порт Gigabit Ethernet, 3.5 мм аудіороз'єм, порт CSI для камери, порт DSI для дисплея, роз'єм GPIO 40-pin; зв'язок – підтримка бездротових зв'язків Wi-Fi 802.11ac та Bluetooth 5.0; сховище – слот для microSD карти; відео – підтримка відеовідтворення високої роздільної здатності до 4K; операційна система – підтримується багато операційних систем, включаючи Raspbian (базова операційна система для Raspberry Pi), Ubuntu, Windows 10 IoT і багато інших; ціна Raspberry Pi 4 Model B зазвичай залежить від обсягу пам'яті RAM та комплектації (чи входить живлення, корпус та інші аксесуари) – зазвичай вартість починається від приблизно 35-40 доларів за базову модель без аксесуарів;

2) Arduino – також популярна платформа для розробки IoT-проектів; використовується для збору даних з різних датчиків та керування різними пристроями в межах міста; характеристики Arduino Uno: мікроконтролер – ATmega328P, оперативна пам'ять -2 КБ, частота процесора – 16 МГц, з'єднання – USB, GPIO, аналогові входи та інші, вартість – приблизно 20-25 доларів; характеристики Arduino Mega 2560: мікроконтролер – ATmega2560, оперативна пам'ять – 8 КБ, частота процесора – 16 МГц, з'єднання – USB, GPIO, аналогові входи та інші, вартість – приблизно 40-50 доларів; характеристики Arduino Nano: мікроконтролер – ATmega328, оперативна пам'ять – 2 КБ, частота процесора – 16 МГц, з'єднання – USB, GPIO, аналогові входи та інші, вартість – приблизно 10-15 доларів; Arduino Due: мікроконтролер – AT91SAM3X8E, оперативна пам'ять – 96 КБ, частота процесора – 84 МГц, з'єднання – USB, GPIO, аналогові входи та інші, вартість – приблизно 40-50 доларів;

3) ESP32 – це мікроконтролер на основі Wi-Fi і Bluetooth, який також може використовуватися для розробки систем "Розумного міста"; має велику кількість вбудованих функцій для бездротового зв'язку та обробки даних; характеристики ESP32: мікроконтролер – двоядерний мікроконтролер Tensilica LX6, оперативна пам'ять (RAM) – 520 КБ, Flash-пам'ять – 4 МБ, вхідні/вихідні порти – залежать від конкретної моделі, зазвичай є кілька цифрових та аналогових портів, швидкість процесора – до 240 МГц, інтерфейси – Wi-Fi 802.11 b/g/n, Bluetooth 4.2 BLE, UART, I2C, SPI, ADC, DAC, GPIO та інші, робоча напруга – 3,3 В, операційна система – може використовуватися з Arduino IDE, MicroPython, ESP-IDF та іншими середовищами розробки; ціна ESP32 зазвичай залежить від конкретної моделі, виробника та розміру пам'яті, зазвичай ціна для одиниці з базовим набором функцій коливається від приблизно 3 до 10 доларів;

4) Particle Photon – інша платформа для розробки IoT-проектів, яка має вбудований Wi-Fi та може бути використана для збору даних та керування пристроями у місті; мікроконтролер з Wi-Fi, спеціально розроблений для розробки пристроїв Інтернету речей (IoT); характеристики Particle Photon: мікроконтролер – ARM Cortex-M3 STM32F205RG, оперативна пам'ять (RAM) – 128 КБ, Flash-пам'ять

– 1 МБ, інтерфейси – Wi-Fi 802.11 b/g/n, UART, I2C, SPI, ADC, GPIO, швидкість процесора – 120 МГц, робоча напруга – 3,3 В, розміри – 36 мм x 21 мм, операційна система – працює з Particle Cloud, може використовуватися з Particle Web IDE або іншими середовищами розробки, ціна Particle Photon зазвичай становить приблизно 19-20 доларів за одиницю;

5) Intel Edison – це компактний комп'ютер на основі архітектури Intel, який може бути використаний для створення різноманітних IoT-прикладів, включаючи підсистеми «Розумного міста»; мініатюрний комп'ютер у форм-факторі вузького пристрою, розроблений спеціально для розробки Інтернету речей (IoT); характеристики Intel Edison: мікропроцесор – Intel Atom (2-ядерний, 500 МГц), оперативна пам'ять (RAM) – 1 ГБ, Flash-пам'ять – 4 ГБ, інтерфейси – Wi-Fi, Bluetooth 4.0, USB, UART, I2C, SPI, GPIO, робоча напруга – 3,3 В або 5 В, розміри – 35,5 мм x 25 мм x 3.9 мм, операційна система – Linux, ціна Intel Edison може коливатися від 50 до 70 доларів за одиницю, залежно від комплектації та продавця.

Враховуючи характеристики та вартість різних IoT-контролерів, оберемо для підсистеми моніторингу якості атмосферного повітря кіберфізичної системи «Розумне місто» контролер ESP32 (рис. 2.7).

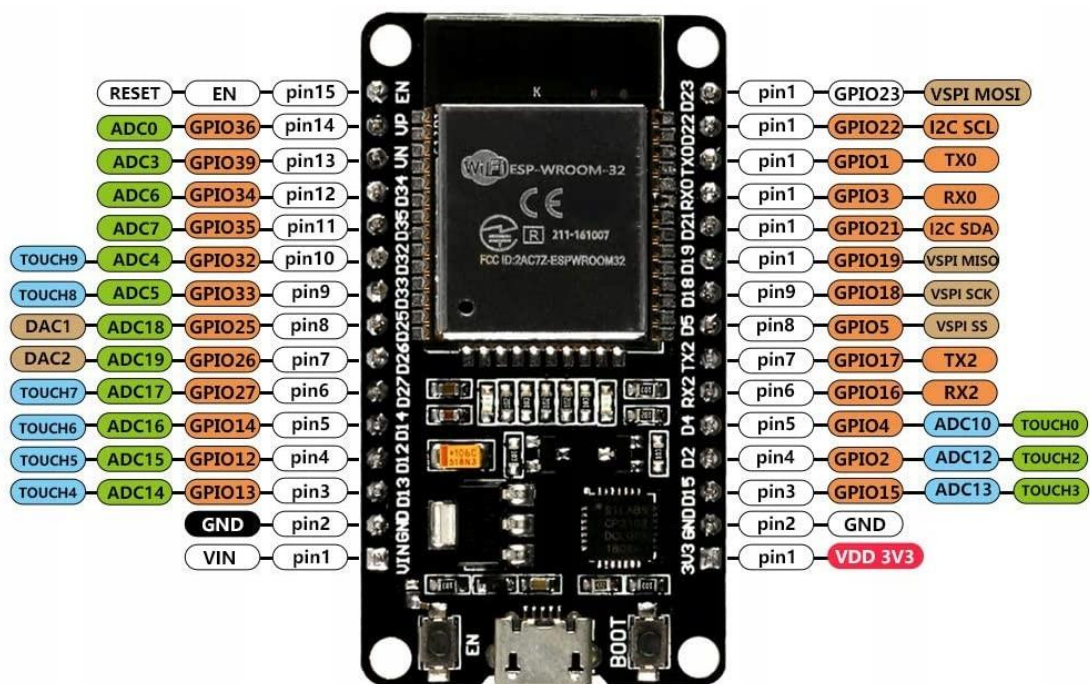


Рисунок 2.7 – IoT-контролер ESP32 [100]

Стандарт передачі даних для кіберфізичної системи «Розумне місто» може залежати від конкретних вимог проєкту та використовуваних технологій. Одним із найбільш поширених стандартів для передачі даних в мережі IoT є MQTT (Message Queuing Telemetry Transport). MQTT є легким протоколом, який ефективно використовує ресурси мережі та може працювати в умовах обмеженого пропускнуго потоку. Інші популярні стандарти включають HTTP, CoAP (Constrained Application Protocol), AMQP (Advanced Message Queuing Protocol) та інші. Вибір стандарту передачі даних залежить від конкретних потреб проєкту, його характеристик та вимог до безпеки, енергоефективності та масштабованості. Наприклад, якщо система має працювати в умовах обмеженого живлення або потребує надійного та ефективного каналу передачі даних, то може бути обрано MQTT. Якщо ж вимоги до енергоефективності та масштабованості менш важливі, то може бути використаний HTTP або інші протоколи.

Контролер ESP32 підтримує стандарт MQTT. Він може бути програмований для взаємодії з MQTT-брокерами, які забезпечують обмін повідомленнями за допомогою протоколу MQTT. Це дозволяє ESP32 використовуватись у розумних мережевих пристроях та інших проєктах Інтернету речей (IoT), які потребують надійної передачі даних через мережу. Існують бібліотеки для ESP32, які спрощують використання MQTT і забезпечують легке підключення до брокерів MQTT.

Отже, для налагодження зв'язку між компонентами всіх трьох рівнів підсистеми моніторингу якості атмосферного повітря кіберфізичної системи «Розумне місто» оберемо стандарт для передачі даних MQTT.

2.2 Моделювання процесу моніторингу якості атмосферного повітря у кіберфізичній системі «Розумне місто»

Отже, в результаті проведеного дослідження було сформовано перелік показників та забруднювачів атмосферного повітря, які будуть в фокусі уваги

процесу моніторингу якості атмосферного повітря у кіберфізичній системі «Розумне місто»:

- 1) вологість повітря;
- 2) температура повітря;
- 3) вміст пилу у повітрі, в т.ч. частинок PM 2.5, PM10;
- 4) радіаційний фон повітря;
- 5) рівень забруднення повітря оксидами азоту;
- 6) рівень забруднення повітря сіркою та її сполуками;
- 7) рівень забруднення повітря вуглецевими сполуками;
- 8) рівень забруднення повітря парниковими газами CO, CO₂, NH₃, NO тощо.

Нехай $adcth$ – нормальне значення вмісту пилу у повітрі, а adc_i – значення вмісту пилу у повітрі даного району з множини значень вмісту пилу у повітрі $ADC = \{adc_1, adc_2, \dots, adc_n\}$, тоді критерій забруднення повітря пилом має вигляд:

- якщо $adc_i > adcth$, то вміст пилу у повітрі перевищує норму;
- якщо $adc_i \leq adcth$, то вміст пилу у повітрі не перевищує норму.

Нехай $apmmth$ – нормальне значення вмісту частинок PM2.5 у повітрі, а $apmm_i$ – значення вмісту частинок PM2.5 у повітрі даного району з множини значень вмісту частинок PM2.5 у повітрі $APMM = \{apmm_1, apmm_2, \dots, apmm_n\}$, тоді критерій забруднення повітря частинками PM2.5 має вигляд:

- якщо $apmm_i > apmmth$, то вміст частинок PM2.5 у повітрі перевищує норму;
- якщо $apmm_i \leq apmmth$, то вміст частинок PM2.5 у повітрі не перевищує норму.

Нехай $apmtth$ – нормальне значення вмісту частинок PM10 у повітрі, а $apmt_i$ – значення вмісту частинок PM10 у повітрі даного району з множини значень вмісту частинок PM10 у повітрі $APMT = \{apmt_1, apmt_2, \dots, apmt_n\}$, тоді критерій забруднення повітря частинками PM10 має вигляд:

- якщо $apmt_i > apmtth$, то вміст частинок PM10 у повітрі перевищує норму;
- якщо $apmt_i \leq apmtth$, то вміст частинок PM10 у повітрі не перевищує норму.

Нехай $arbtth$ – нормальне значення радіаційного фону повітря, а $arbt_i$ – значення радіаційного фону повітря даного району з множини значень радіаційного

фону повітря $ARB = \{arb_1, arb_2, \dots, arb_n\}$, тоді критерій підвищеного радіаційного фону повітря має вигляд:

- якщо $arb_i > arb_{th}$, то радіаційний фон повітря перевищує норму;
- якщо $arb_i \leq arb_{th}$, то радіаційний фон повітря не перевищує норму.

Нехай an_{oth} – нормальне значення вмісту оксидів азоту у повітрі, а an_{o_i} – значення рівня забруднення повітря оксидами азоту даного району з множини значень рівня забруднення повітря оксидами азоту $ANO = \{an_{o_1}, an_{o_2}, \dots, an_{o_n}\}$, тоді критерій забруднення повітря оксидами азоту має вигляд:

- якщо $an_{o_i} > an_{oth}$, то рівень забруднення повітря оксидами азоту перевищує норму;
- якщо $an_{o_i} \leq an_{oth}$, то рівень забруднення повітря оксидами азоту не перевищує норму.

Нехай as_{th} – нормальне значення вмісту сірки та сірчаних сполук у повітрі, а as_i – значення рівня забруднення повітря сіркою даного району з множини значень рівня забруднення повітря сіркою $AS = \{as_1, as_2, \dots, as_n\}$, тоді критерій забруднення повітря сіркою та сірчаними сполуками має вигляд:

- якщо $as_i > as_{th}$, то рівень забруднення повітря сіркою та сірчаними сполуками перевищує норму;
- якщо $as_i \leq as_{th}$, то рівень забруднення повітря сіркою та сірчаними сполуками не перевищує норму.

Нехай ac_{sth} – нормальне значення вмісту вуглецевих сполук у повітрі, а acc_i – значення рівня забруднення повітря вуглецевими сполуками даного району з множини значень рівня забруднення повітря вуглецевими сполуками $ACC = \{acc_1, acc_2, \dots, acc_n\}$, тоді критерій забруднення повітря вуглецевими сполуками має вигляд:

- якщо $acc_i > ac_{sth}$, то рівень забруднення повітря вуглецевими сполуками перевищує норму;
- якщо $acc_i \leq ac_{sth}$, то рівень забруднення повітря вуглецевими сполуками не перевищує норму.

Нехай aco_{th} – нормальне значення вмісту парникового газу CO, а aco_i – значення рівня забруднення повітря парниковим газом CO даного району з множини значень рівня забруднення повітря парниковим газом CO $ACO = \{aco_1, aco_2, \dots, aco_n\}$, тоді критерій забруднення повітря парниковим газом CO має вигляд:

- якщо $aco_i > aco_{th}$, то рівень забруднення повітря парниковим газом CO перевищує норму;
- якщо $aco_i \leq aco_{th}$, то рівень забруднення повітря парниковим газом CO не перевищує норму.

Нехай aco_{oth} – нормальне значення вмісту парникового газу CO₂, а aco_i – значення рівня забруднення повітря парниковим газом CO₂ даного району з множини значень рівня забруднення повітря парниковим газом CO₂ $ACOO = \{aco_{o1}, aco_{o2}, \dots, aco_{on}\}$, тоді критерій забруднення повітря парниковим газом CO₂ має вигляд:

- якщо $aco_{oi} > aco_{oth}$, то рівень забруднення повітря парниковим газом CO₂ перевищує норму;
- якщо $aco_{oi} \leq aco_{oth}$, то рівень забруднення повітря парниковим газом CO₂ не перевищує норму.

Нехай anh_{th} – нормальне значення вмісту парникового газу NH₃, а anh_i – значення рівня забруднення повітря парниковим газом NH₃ даного району з множини значень рівня забруднення повітря парниковим газом NH₃ $ANH = \{anh_1, anh_2, \dots, anh_n\}$, тоді критерій забруднення повітря парниковим газом NH₃ має вигляд:

- якщо $anh_i > anh_{th}$, то рівень забруднення повітря парниковим газом NH₃ перевищує норму;
- якщо $anh_i \leq anh_{th}$, то рівень забруднення повітря парниковим газом NH₃ не перевищує норму.

Нехай ana_{oth} – нормальне значення вмісту парникового газу NO, а anh_i – значення рівня забруднення повітря парниковим газом NO даного району з множини значень рівня забруднення повітря парниковим газом NO $ANAo = \{ana_{o1},$

$anao_2, \dots, anao_n$ }, тоді критерій забруднення повітря парниковим газом NO має вигляд:

- якщо $anao_i > anaoth$, то рівень забруднення повітря парниковим газом NO перевищує норму;
- якщо $anao_i \leq anaoth$, то рівень забруднення повітря парниковим газом NO не перевищує норму.

Враховуючи представлені критерії забруднення повітря різними речовинами, загальне правило для прийняття рішення щодо перевищення/неперевищення норми рівня забруднення повітря одним чи декількома забруднювачами матиме вигляд:

- якщо $adc_i > adcth$ та/або $apmm_i > apmmth$ та/або $apmt_i > apmtth$ та/або $arb_i > arbth$ та/або $ano_i > anoth$ та/або $as_i > asth$ та/або $acc_i > accth$ та/або $aco_i > acoth$ та/або $acoo_i > acooth$ та/або $anh_i > anhth$ та/або $anao_i > anaoth$, то рівень забруднення повітря одним чи декількома забруднювачами перевищує норму;
- якщо $adc_i \leq adcth$ та $apmm_i \leq apmmth$ та $apmt_i \leq apmtth$ та $arb_i \leq arbth$ та $ano_i \leq anoth$ та $as_i \leq asth$ та $acc_i \leq accth$ та $aco_i \leq acoth$ та $acoo_i \leq acooth$ та $anh_i \leq anhth$ та $anao_i \leq anaoth$, то рівень забруднення повітря жодним забруднювачем не перевищує норму.

2.3 Висновки

У розділі 2 кваліфікаційної роботи виконано вибір датчиків для формування нижнього рівня підсистеми моніторингу якості атмосферного повітря кіберфізичної системи «Розумне місто». Оскільки ціна проаналізованих датчиків вимірювання вологості та температури приблизно однакова, то для підсистеми обрано датчик SHT20, який має високу точність, а також працює на екстремальних вологості та температурах, що важливо, враховуючи його вуличне використання у підсистемі моніторингу якості атмосферного повітря кіберфізичної системи «Розумне місто». Оскільки ціна проаналізованих датчиків вмісту пилу у повітрі суттєво різняться, то для підсистеми моніторингу якості атмосферного повітря кіберфізичної системи «Розумне місто» обрано датчик Nova SDS011, який має

високу точність, а також вимірює концентрацію частинок PM_{2.5}, PM₁₀ дрібнодисперсного пилу, які є однією з найбільш шкідливих форм забруднення повітря. Враховуючи особливості та призначення підсистеми моніторингу якості атмосферного повітря кіберфізичної системи «Розумне місто», для вимірювання радіаційного фону повітря обрано датчик Radex RD1503, який є компактним і відносно недорогим, для вимірювання рівнів різних оксидів азоту NO_x обрано датчик Figaro TGS 2600, який є відносно недорогим, для вимірювання рівня сірки та вуглеводнів обрано датчик Horiba APDA-372, для вимірювання рівня парникових газів обрано датчик SGX Sensortech MiCS-VZ-86.

Крім цього, у розділі 2 кваліфікаційної роботи виконано вибір контролера для формування середнього рівня підсистеми моніторингу якості атмосферного повітря кіберфізичної системи «Розумне місто». Враховуючи характеристики та вартість різних IoT-контролерів, для підсистеми моніторингу якості атмосферного повітря кіберфізичної системи «Розумне місто» обрано контролер ESP32.

Також у розділі 2 кваліфікаційної роботи виконано вибір стандарту для передачі даних для налагодження зв'язку між компонентами всіх трьох рівнів підсистеми моніторингу якості атмосферного повітря кіберфізичної системи «Розумне місто» – обрано стандарт для передачі даних MQTT.

Враховуючи визначені забруднювачі атмосферного повітря, які будуть в фокусі уваги процесу моніторингу якості атмосферного повітря у кіберфізичній системі «Розумне місто», в розділі 2 кваліфікаційної роботи розроблені критерій забруднення повітря пилом, критерій забруднення повітря частинками PM_{2.5}, критерій забруднення повітря частинками PM₁₀, критерій підвищеного радіаційного фону повітря, критерій забруднення повітря оксидами азоту, критерій забруднення повітря сіркою та сірчаними сполуками, критерій забруднення повітря вуглецевими сполуками, критерій забруднення повітря парниковим газом CO, критерій забруднення повітря парниковим газом CO₂, критерій забруднення повітря парниковим газом NH₃, критерій забруднення повітря парниковим газом NO, а також загальне правило загальне правило для прийняття рішення щодо перевищення/неперевищення норми рівня забруднення повітря одним чи декількома забруднювачами.

3 МЕТОД ТА АЛГОРИТМ МОНІТОРИНГУ ЯКОСТІ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ У КІБЕРФІЗИЧНІЙ СИСТЕМІ «РОЗУМНЕ МІСТО»

3.1 Метод моніторингу якості атмосферного повітря у кіберфізичній системі «Розумне місто»

Перш ніж перейти до розроблення методу моніторингу якості атмосферного повітря у кіберфізичній системі «Розумне місто», визначимо мету та об'єкти моніторингу якості повітря, наприклад, вимірювання різних параметрів повітря та поточний моніторинг якості повітря, виявлення джерел забруднення та їх розташування в різних районах міста, виявлення впливу забруднення атмосферного повітря на здоров'я мешканців міста / району міста, виявлення тенденцій зміни якості повітря та подальшого прогнозування якості повітря тощо. Для даного дослідження конкретною ціллю буде вимірювання різних параметрів повітря та поточний моніторинг якості повітря.

Метод моніторингу якості атмосферного повітря у кіберфізичній системі «Розумне місто» складається з наступних кроків:

1) задання множини нормальних значень параметрів повітря: вмісту пилу у повітрі ($adcth$), в т. ч. PM2.5 ($apmmth$), PM10 ($apmtth$), радіаційного фону повітря ($arbth$), рівня забруднення повітря оксидами азоту ($anoth$), рівня забруднення повітря сіркою ($asth$), рівня забруднення повітря вуглецевими сполуками ($accth$), рівня забруднення повітря парниковими газами CO ($acoth$), CO2 ($acooth$), NH3 ($anhth$), NO ($anaoth$): $APTH = \{apth_1, apth_2, \dots, apth_{11}\} = \{adcth, apmmth, apmtth, arbth, anoth, asth, accth, acoth, acooth, anhth, anaoth\}$, по перевищенню яких відбувається сповіщення мешканців міста про небезпеку та надання рекомендацій щодо захисту їх здоров'я;

2) розміщення датчиків – систематичне розташування відповідних датчиків для вимірювання ключових параметрів якості повітря, таких як вологість повітря, температура повітря, вміст пилу у повітрі, в тому числі частинок PM2.5, PM10, радіаційний фон повітря, рівень забруднення повітря оксидами азоту, рівень

забруднення повітря сіркою, рівень забруднення повітря вуглецевими сполуками, рівень забруднення повітря парниковими газами CO, CO₂, NH₃, NO, у різних районах міста для забезпечення репрезентативності та охоплення всієї території міста; якщо є потреба вимірювання параметрів повітря у важкодоступних місцях, то відповідними датчиками можуть бути облаштовані дрони або роботи;

3) збір даних з встановлених датчиків, підключених у мережу Інтернету речей:

- 3.1) формування множини значень вологості повітря $AH = \{ah_1, ah_2, \dots, ah_n\}$ на основі даних, отриманих з n датчиків вологості повітря, розташованих в n районах міста;
- 3.2) формування множини значень температури повітря $AT = \{at_1, at_2, \dots, at_n\}$ на основі даних, отриманих з n датчиків температури повітря, розташованих в n районах міста;
- 3.3) формування множини значень вмісту пилу у повітрі $ADC = \{adc_1, adc_2, \dots, adc_n\}$ на основі даних, отриманих з n датчиків вмісту пилу у повітрі, розташованих в n районах міста;
- 3.4) формування множини значень вмісту частинок PM2.5 у повітрі $APMM = \{apmm_1, apmm_2, \dots, apmm_n\}$ на основі даних, отриманих з n датчиків вмісту пилу у повітрі, розташованих в n районах міста;
- 3.5) формування множини значень вмісту частинок PM 10 у повітрі $APMT = \{apmt_1, apmt_2, \dots, apmt_n\}$ на основі даних, отриманих з n датчиків вмісту пилу у повітрі, розташованих в n районах міста;
- 3.6) формування множини значень радіаційного фону повітря $ARB = \{arb_1, arb_2, \dots, arb_n\}$ на основі даних, отриманих з n датчиків радіаційного фону повітря, розташованих в n районах міста;
- 3.7) формування множини значень рівня забруднення повітря оксидами азоту $ANO = \{ano_1, ano_2, \dots, ano_n\}$ на основі даних, отриманих з n датчиків забруднення повітря оксидами азоту, розташованих в n районах міста;

- 3.8) формування множини значень рівня забруднення повітря сіркою $AS = \{as_1, as_2, \dots, as_n\}$ на основі даних, отриманих з n датчиків забруднення повітря сіркою, розташованих в n районах міста;
- 3.9) формування множини значень рівня забруднення повітря вуглецевими сполуками $ACC = \{acc_1, acc_2, \dots, acc_n\}$ на основі даних, отриманих з n датчиків забруднення повітря вуглецевими сполуками, розташованих в n районах міста;
- 3.10) формування множини значень рівня забруднення повітря парниковим газом CO $ACO = \{aco_1, aco_2, \dots, aco_n\}$ на основі даних, отриманих з n датчиків забруднення повітря парниковим газом CO, розташованих в n районах міста;
- 3.11) формування множини значень рівня забруднення повітря парниковим газом CO₂ $ACOO = \{acoo_1, acoo_2, \dots, acoo_n\}$ на основі даних, отриманих з n датчиків забруднення повітря парниковим газом CO₂, розташованих в n районах міста;
- 3.12) формування множини значень рівня забруднення повітря парниковим газом NH₃ $ANH = \{anh_1, anh_2, \dots, anh_n\}$ на основі даних, отриманих з n датчиків забруднення повітря парниковим газом NH₃, розташованих в n районах міста;
- 3.13) формування множини значень рівня забруднення повітря парниковим газом NO $ANAo = \{anao_1, anao_2, \dots, anao_n\}$ на основі даних, отриманих з n датчиків забруднення повітря парниковим газом NO, розташованих в n районах міста;
- 4) передача зібраних даних в реальному часі із застосуванням мережі Інтернету речей до серверу обробки даних;
- 5) обробка та аналіз отриманих даних в реальному часі з використанням різних аналітичних методів – або з метою поточного моніторингу якості атмосферного повітря, або з метою виявлення джерел забруднення повітря та їх розташування в різних районах міста, або з метою виявлення впливу забруднення атмосферного повітря на здоров'я мешканців міста / району міста, або з метою

виявлення тенденцій та подальшого прогнозування якості повітря тощо; для даного дослідження, враховуючи обрану мету моніторингу якості повітря, обробка та аналіз отриманих даних виконуватиметься виключно з метою поточного моніторингу якості атмосферного повітря;

б) візуалізація результатів моніторингу якості повітря – у вигляді карти міста з n районів із графічним відображенням всіх параметрів повітря за допомогою кольорових схем або позначень, що вказують на інтенсивність забруднення повітря, у вигляді графіків та/або діаграм для зручного сприйняття та аналізу міською владою, дослідниками та мешканцями міста;

7) вибір параметрів повітря користувачем – вибір параметрів повітря, які цікавлять користувача (користувач може обрати від 1 до 13 вищеописаних параметрів);


8) визначення, чи перевищує норму рівень забруднення повітря одним чи декількома забруднювачами, які цікавлять користувача (обрані на кроці 7);


9) адаптація візуалізації результатів моніторингу якості повітря під потреби користувача – у вигляді карти міста з n районів із графічним відображенням тих параметрів повітря, які цікавлять користувача, за допомогою кольорових схем або позначень, що вказують на інтенсивність забруднення повітря, у вигляді графіків та/або діаграм для зручного сприйняття та аналізу міською владою, дослідниками та мешканцями міста:


9.1) якщо на кроці 7 користувач обрав параметр «вологість повітря», то користувачу формується карта міста з n районів, на кожному з яких наведено відповідне значення вологості повітря даного району з множини значень вологості повітря $AH = \{ah_1, ah_2, \dots, ah_n\}$;

9.2) якщо на кроці 7 користувач обрав параметр «температура повітря», то користувачу формується карта міста з n районів, на кожному з яких наведено відповідне значення температури повітря даного району з множини значень температури повітря $AT = \{at_1, at_2, \dots, at_n\}$;


9.3) якщо на кроці 7 користувач обрав параметр «вміст пилу у повітрі», то користувачу формується карта міста з n районів, на кожному з яких


наведено відповідне значення вмісту пилу у повітрі даного району з множини значень вмісту пилу у повітрі $ADC = \{adc_1, adc_2, \dots, adc_n\}$; якщо у i -му районі міста $adc_i > adcth$, то мобільний додаток, який працює в фоновому режимі, видає звуковий сигнал, а на зображенні району на карті міста в додатку з'являється миготливий знак , який сигналізує про небезпеку в даному районі міста; натискання на цей знак виводить на екран сповіщення: «Вміст пилу у повітрі перевищує норму» та рекомендації щодо захисту здоров'я мешканців в такому випадку;

- 9.4) якщо на кроці 7 користувач обрав параметр «вміст частинок PM2.5 у повітрі», то користувачу формується карта міста з n районів, на кожному з яких наведено відповідне значення рівня забруднення повітря частинками PM2.5 даного району з множини значень вмісту частинок PM2.5 у повітрі $APMM = \{apmt_1, apmt_2, \dots, apmt_n\}$; якщо у i -му районі міста $apmt_i > apmtth$, то мобільний додаток, який працює в фоновому режимі, видає звуковий сигнал, а на зображенні району на карті міста в додатку з'являється миготливий знак , який сигналізує про небезпеку в даному районі міста; натискання на цей знак виводить на екран сповіщення: «Вміст частинок PM2.5 у повітрі перевищує норму» та рекомендації щодо захисту здоров'я мешканців в такому випадку;

- 9.5) якщо на кроці 7 користувач обрав параметр «вміст частинок PM10», то користувачу формується карта міста з n районів, на кожному з яких наведено відповідне значення рівня забруднення повітря частинками PM10 даного району з множини значень вмісту частинок PM10 у повітрі $APMT = \{apmt_1, apmt_2, \dots, apmt_n\}$; якщо у i -му районі міста $apmt_i > apmtth$, то мобільний додаток, який працює в фоновому режимі, видає звуковий сигнал, а на зображенні району на карті міста в додатку з'являється миготливий знак , який сигналізує про небезпеку в даному районі міста; натискання на цей знак виводить на екран сповіщення: «Вміст

частинок PM10 у повітрі перевищує норму» та рекомендації щодо захисту здоров'я мешканців в такому випадку;

9.6) якщо на кроці 7 користувач обрав параметр «радіаційний фон повітря», то користувачу формується карта міста з n районів, на кожному з яких наведено відповідне значення радіаційного фону повітря даного району з множини значень радіаційного фону повітря $ARB = \{arb_1, arb_2, \dots, arb_n\}$; якщо у i -му районі міста $arb_i > arb_{th}$, то мобільний додаток, який працює в фоновому режимі, видає звуковий сигнал, а на зображенні району на карті міста в додатку з'являється миготливий знак , який сигналізує про небезпеку в даному районі міста; натискання на цей знак виводить на екран сповіщення: «Радіаційний фон повітря перевищує норму» та рекомендації щодо захисту здоров'я мешканців в такому випадку;

9.7) якщо на кроці 7 користувач обрав параметр «рівень забруднення повітря оксидами азоту», то користувачу формується карта міста з n районів, на кожному з яких наведено відповідне значення рівня забруднення повітря оксидами азоту даного району з множини значень рівня забруднення повітря оксидами азоту $ANO = \{ano_1, ano_2, \dots, ano_n\}$; якщо у i -му районі міста $ano_i > ano_{th}$, то мобільний додаток, який працює в фоновому режимі, видає звуковий сигнал, а на зображенні району на карті міста в додатку з'являється миготливий знак , який сигналізує про небезпеку в даному районі міста; натискання на цей знак виводить на екран сповіщення: «Рівень забруднення повітря оксидами азоту перевищує норму» та рекомендації щодо захисту здоров'я мешканців в такому випадку;

9.8) якщо на кроці 7 користувач обрав параметр «рівень забруднення повітря сіркою», то користувачу формується карта міста з n районів, на кожному з яких наведено відповідне значення рівня забруднення повітря сіркою даного району з множини значень рівня забруднення повітря сіркою $AS = \{as_1, as_2, \dots, as_n\}$; якщо у i -му районі міста $as_i > as_{th}$, то мобільний

додаток, який працює в фоновому режимі, видає звуковий сигнал, а на зображенні району на карті міста в додатку з'являється миготливий знак



, який сигналізує про небезпеку в даному районі міста; натискання на цей знак виводить на екран сповіщення: «Рівень забруднення повітря сіркою перевищує норму» та рекомендації щодо захисту здоров'я мешканців в такому випадку;

- 9.9) якщо на кроці 7 користувач обрав параметр «рівень забруднення повітря вуглецевими сполуками», то користувачу формується карта міста з n районів, на кожному з яких наведено відповідне значення рівня забруднення повітря вуглецевими сполуками даного району з множини значень рівня забруднення повітря вуглецевими сполуками $ACC = \{acc_1, acc_2, \dots, acc_n\}$; якщо у i -му районі міста $acc_i > accth$, то мобільний додаток, який працює в фоновому режимі, видає звуковий сигнал, а на зображенні району на карті міста в додатку з'являється миготливий знак




, який сигналізує про небезпеку в даному районі міста; натискання на цей знак виводить на екран сповіщення: «Рівень забруднення повітря вуглецевими сполуками перевищує норму» та рекомендації щодо захисту здоров'я мешканців в такому випадку;


- 9.10) якщо на кроці 7 користувач обрав параметр «рівень забруднення повітря парниковим газом CO», то користувачу формується карта міста з n районів, на кожному з яких наведено відповідне значення рівня забруднення повітря парниковим газом CO даного району з множини значень рівня забруднення повітря парниковим газом CO $ACO = \{aco_1, aco_2, \dots, aco_n\}$; якщо у i -му районі міста $aco_i > acoth$, то мобільний додаток, який працює в фоновому режимі, видає звуковий сигнал, а на зображенні району на карті міста в додатку з'являється миготливий знак




, який сигналізує про небезпеку в даному районі міста; натискання на цей знак виводить на екран сповіщення: «Рівень забруднення повітря

парниковим газом CO перевищує норму» та рекомендації щодо захисту здоров'я мешканців в такому випадку;

9.11) якщо на кроці 7 користувач обрав параметр «рівень забруднення повітря парниковим газом CO₂», то користувачу формується карта міста з n районів, на кожному з яких наведено відповідне значення рівня забруднення повітря парниковим газом CO₂ даного району з множини значень рівня забруднення повітря парниковим газом CO₂ $ASCOO = \{ascoo_1, ascoo_2, \dots, ascoo_n\}$; якщо у i -му районі міста $ascoo_i > ascooth$, то мобільний додаток, який працює в фоновому режимі, видає звуковий сигнал, а на зображенні району на карті міста в додатку з'являється миготливий знак , який сигналізує про небезпеку в даному районі міста; натискання на цей знак виводить на екран сповіщення: «Рівень забруднення повітря парниковим газом CO₂ перевищує норму» та рекомендації щодо захисту здоров'я мешканців в такому випадку;

9.12) якщо на кроці 7 користувач обрав параметр «рівень забруднення повітря парниковим газом NH₃», то користувачу формується карта міста з n районів, на кожному з яких наведено відповідне значення рівня забруднення повітря парниковим газом NH₃ даного району з множини значень рівня забруднення повітря парниковим газом NH₃ $ANH = \{anh_1, anh_2, \dots, anh_n\}$; якщо у i -му районі міста $anh_i > anhth$, то мобільний додаток, який працює в фоновому режимі, видає звуковий сигнал, а на зображенні району на карті міста в додатку з'являється миготливий знак , який сигналізує про небезпеку в даному районі міста; натискання на цей знак виводить на екран сповіщення: «Рівень забруднення повітря парниковим газом NH₃ перевищує норму» та рекомендації щодо захисту здоров'я мешканців в такому випадку;

9.13) якщо на кроці 7 користувач обрав параметр «рівень забруднення повітря парниковим газом NO», то користувачу формується карта міста з n районів, на кожному з яких наведено відповідне значення рівня

забруднення повітря парниковим газом NO даного району з множини значень рівня забруднення повітря парниковим газом $NO_{ANAO} = \{anao_1, anao_2, \dots, anao_n\}$; якщо у i -му районі міста $anao_i > anaoth$, то мобільний додаток, який працює в фоновому режимі, видає звуковий сигнал, а на зображенні району на карті міста в додатку з'являється миготливий знак , який сигналізує про небезпеку в даному районі міста; натискання на цей знак виводить на екран сповіщення: «Рівень забруднення повітря парниковим газом NO перевищує норму» та рекомендації щодо захисту здоров'я мешканців в такому випадку.

Розроблений метод моніторингу якості атмосферного повітря становить основу для ефективного моніторингу якості атмосферного повітря у кіберфізичній системі «Розумне місто» і дозволяє приймати обґрунтовані рішення щодо сповіщення мешканців про небезпеку із наданням рекомендацій щодо захисту їх здоров'я. Використання такого методу моніторингу дозволяє містам отримувати точну та актуальну інформацію про якість повітря, що є важливим кроком для прийняття стратегічних рішень з метою зменшення забруднення та покращення якості довкілля. Більш того, надані методом дані можуть бути використані для розробки та впровадження ефективних програм та проєктів з міського планування, транспортної інфраструктури, енергоефективності та інших аспектів життя містян.

3.2 Алгоритм моніторингу якості атмосферного повітря у кіберфізичній системі «Розумне місто»

Алгоритм моніторингу якості атмосферного повітря у кіберфізичній системі «Розумне місто» може включати наступні кроки:

1) збір даних – датчики, розташовані в різних частинах міста, збирають дані про рівні забруднення повітря, концентрацію різних забруднювачів тощо;

2) передача даних – зібрані дані передаються через бездротові мережі (наприклад, Wi-Fi, LoRa, NB-IoT) на центральний сервер або хмарне сховище для подальшої обробки;

3) обробка даних – на центральному сервері або в хмарі дані аналізуються для виявлення тенденцій, аномалій та інших важливих параметрів; використовуються алгоритми машинного навчання та аналізу даних для прогнозування забруднення повітря та виявлення потенційних проблем;

4) візуалізація результатів – отримані дані візуалізуються у вигляді зрозумілих графіків, карт тощо для представлення інформації для кінцевих користувачів, таких як міські управління, жителі міста тощо;

5) надання рекомендацій та прийняття рішень – на основі аналізу даних і результатів моніторингу система може надавати рекомендації міським управлінням або жителям щодо заходів, які можна прийняти для зменшення забруднення повітря та збереження його якості;

6) інформування громадськості – результати моніторингу і аналізу можуть бути доступні громадськості через веб-сайт, мобільний додаток або інші засоби комунікації; це дозволяє жителям міста мати інформацію щодо якості повітря та впливу повітря на їх здоров'я і допомагає залучити громадськість до спільних зусиль з покращення навколишнього середовища;

7) реагування на аварійні ситуації – в разі виявлення надмірного забруднення повітря або небезпечних рівнів шкідливих речовин система може автоматично сповістити відповідні служби та органи влади для прийняття негайних заходів з мінімізації наслідків;

8) збір додаткових даних – крім основних параметрів якості повітря, система може також збирати додаткові дані, такі як погодні умови, температура, вітер, що дозволяє здійснювати більш комплексний аналіз та прогнозування впливу різних факторів на якість повітря;

9) постійне вдосконалення системи – на основі отриманих даних та відгуків користувачів система може постійно вдосконалюватися та оптимізуватися для

більш ефективного моніторингу та управління якістю атмосферного повітря в місті.

Цей алгоритм забезпечуватиме постійний моніторинг та аналіз якості повітря у місті та дозволить приймати ефективні заходи для покращення середовища проживання. Він забезпечує комплексний підхід до моніторингу та управління якістю повітря у місті, що дозволяє забезпечити безпеку та комфорт для мешканців та зберегти навколишнє середовище для майбутніх поколінь.

Розробимо алгоритм моніторингу якості атмосферного повітря у кіберфізичній системі «Розумне місто».

Алгоритм моніторингу якості атмосферного повітря у кіберфізичній системі «Розумне місто» складається з наступних кроків:

- 1) навчання кіберфізичної системи – задання множини нормальних значень параметрів повітря;
- 2) розміщення обраних датчиків;
- 3) збір даних з встановлених датчиків, підключених у мережу Інтернету речей;
- 4) передача зібраних даних в реальному часі із застосуванням мережі Інтернету речей до серверу обробки даних;
- 5) обробка та аналіз отриманих даних в реальному часі з використанням різних аналітичних методів;
- 6) візуалізація результатів моніторингу якості повітря;
- 7) вибір параметрів повітря, які цікавлять користувача;
- 8) визначення, чи перевищує норму рівень забруднення повітря одним чи декількома забруднювачами, які цікавлять користувача;
- 9) адаптація візуалізації результатів моніторингу якості повітря під потреби користувача;
- 10) інформування громадськості в разі, якщо рівень забруднення повітря одним чи декількома забруднювачами перевищує норму.

Блок-схема узагальненого алгоритму моніторингу якості атмосферного повітря у кіберфізичній системі «Розумне місто» представлена на рис. 3.1.

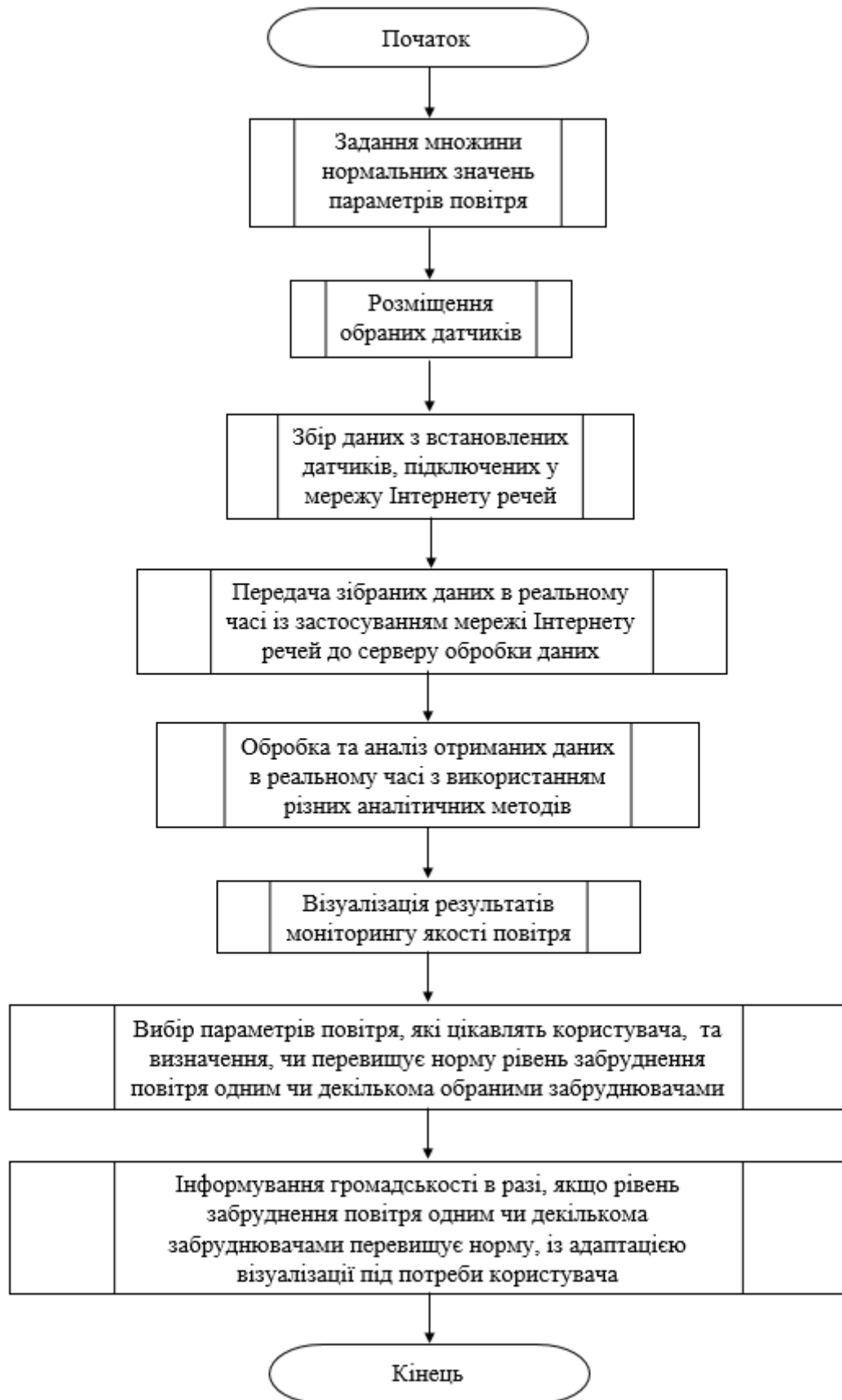


Рисунок 3.1 – Блок-схема узагальненого алгоритму моніторингу якості атмосферного повітря у кіберфізичній системі «Розумне місто»

3.3 Висновки

В розділі 3 кваліфікаційної роботи розроблений метод моніторингу якості атмосферного повітря у кіберфізичній системі «Розумне місто», який становитиме основу для ефективного моніторингу якості атмосферного повітря у кіберфізичній системі «Розумне місто» і дозволяє приймати обґрунтовані рішення щодо сповіщення мешканців про небезпеку із наданням рекомендацій щодо захисту їх здоров'я. Використання такого методу моніторингу дозволяє містам отримувати точну та актуальну інформацію про якість повітря, що є важливим кроком для прийняття стратегічних рішень з метою зменшення забруднення та покращення якості довкілля. Більш того, надані методом дані можуть бути використані для розробки та впровадження ефективних програм та проєктів з міського планування, транспортної інфраструктури, енергоефективності та інших аспектів життя містян.

Крім цього, в розділі 3 кваліфікаційної роботи розроблено алгоритм моніторингу якості атмосферного повітря у кіберфізичній системі «Розумне місто», за яким виконуватиметься постійний моніторинг якості повітря, визначатиметься, чи перевищує норму рівень забруднення повітря одним чи декількома забруднювачами, які цікавлять користувача, відобразатимуться (у візуальному вигляді) рівні забруднення різними забруднювачами повітря різних районів міста тощо, а також відбуватиметься оперативне повідомлення містян про перевищення норми рівня забруднення повітря одним чи декількома забруднювачами. Цей алгоритм дозволяє приймати ефективні заходи для покращення середовища проживання. Він забезпечує комплексний підхід до моніторингу та управління якістю повітря у місті, що дозволяє забезпечити безпеку та комфорт для мешканців та зберегти навколишнє середовище для майбутніх поколінь.

4 ПІДСИСТЕМА МОНІТОРИНГУ ЯКОСТІ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ У КІБЕРФІЗИЧНІЙ СИСТЕМІ «РОЗУМНЕ МІСТО»

4.1 Підсистема моніторингу якості атмосферного повітря у кіберфізичній системі «Розумне місто»

Підсистема моніторингу якості атмосферного повітря у кіберфізичній системі «Розумне місто» відіграє ключову роль у забезпеченні здоров'я та комфорту мешканців, а також в управлінні середовищем. Ця підсистема включає в себе різноманітні датчики, контролери, засоби збору та аналізу даних, а також засоби комунікації.

Основні елементи підсистеми моніторингу якості повітря включають:

1) датчики якості повітря, встановлені по всьому місту і призначені для вимірювання рівня різних забруднюючих речовин у повітрі, таких як оксиди азоту (NO_x), сіркові сполуки, вуглеводні, частки PM10 та PM2.5, а також радіація та інші;

2) контролер, який приймає дані від датчиків, обробляє їх та передає до центрального сервера для подальшого аналізу та відображення;

3) центральний сервер, який агрегує та аналізує дані, забезпечує доступ до них через різні інтерфейси, такі як веб-сайт або мобільний додаток, та виконує інші функції управління та моніторингу;

4) інструменти аналізу та візуалізації даних, які дозволяють відображати інформацію про якість повітря у зручному для користувача форматі, наприклад, на графіках чи картографічних інтерфейсах;

5) система сповіщення та попередження, яка може автоматично генерувати сповіщення та попередження, якщо рівень забруднення повітря перевищує допустимі норми за одним чи кількома показниками;

6) інтеграція з іншими системами «Розумного міста», такими як системи управління транспортом, енергетичні системи або системи безпеки тощо.

Спроекуємо архітектуру підсистеми моніторингу якості атмосферного повітря у кіберфізичній системі «Розумне місто» на основі розробленого методу – рис. 4.1.

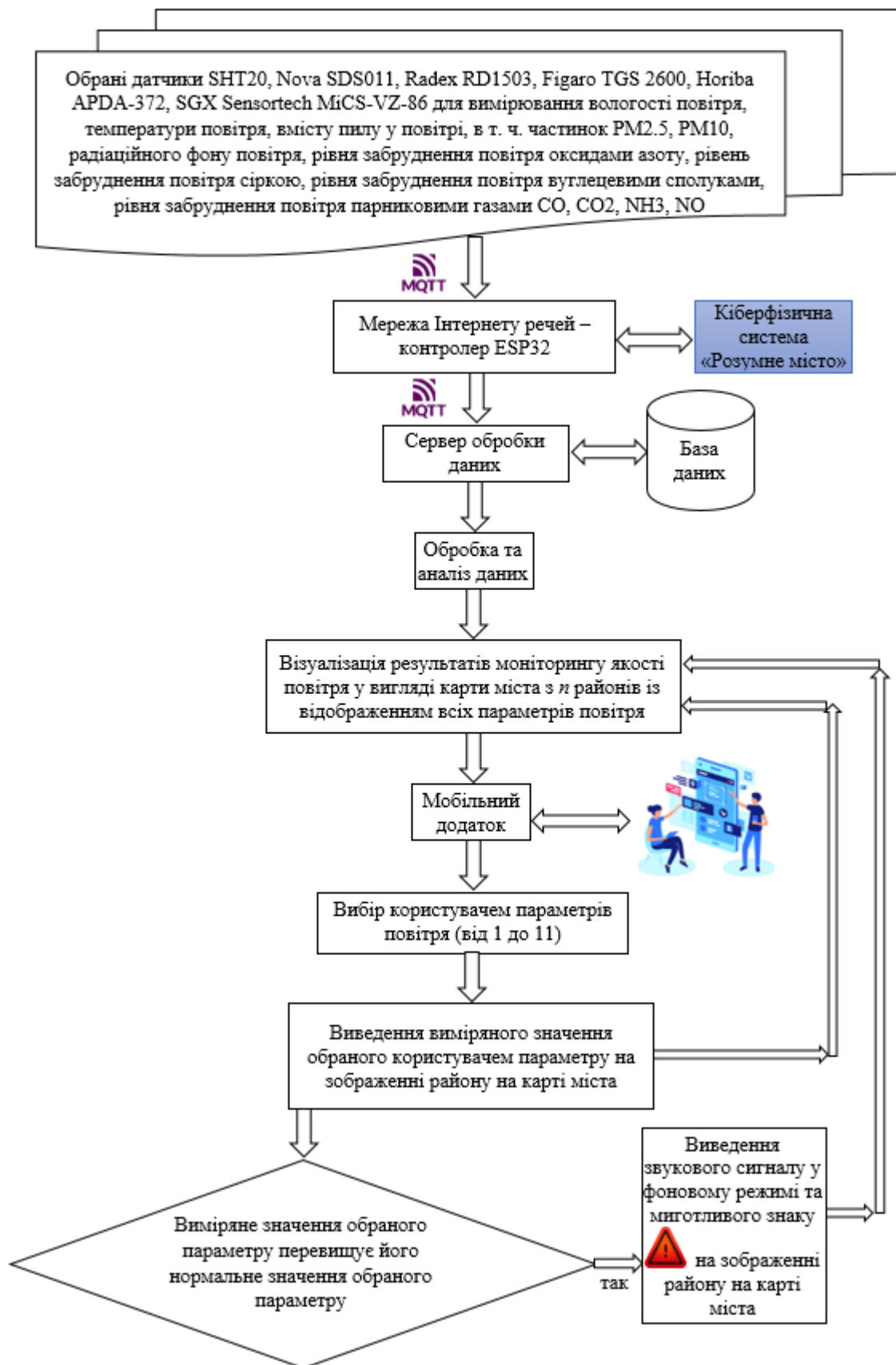


Рисунок 4.1 – Архітектура підсистеми моніторингу якості атмосферного повітря у кіберфізичній системі «Розумне місто»

Отже, розроблена підсистема моніторингу якості атмосферного повітря у кіберфізичній системі «Розумне місто» виконує збір даних з встановлених датчиків вологості повітря, температури повітря, вмісту пилу у повітрі, в т. ч. частинок PM2.5, PM10, радіаційного фону повітря, рівня забруднення повітря оксидами азоту, рівня забруднення повітря сіркою, рівня парниковими газами CO, CO₂, NH₃, NO, передачу зібраних даних в реальному часі до сервера обробки даних, обробку та аналіз отриманих даних в реальному часі з використанням різних аналітичних методів, візуалізацію результатів моніторингу якості повітря у вигляді карти міста з n районів із відображенням всіх параметрів повітря. Користувач в мобільному додатку кіберфізичної системи може виконати вибір параметрів повітря, які його цікавлять. Після вибору таких параметрів відбувається адаптація візуалізації результатів моніторингу якості повітря під потреби користувача – відбувається виведення виміряного значення обраного користувачем параметру на зображенні району на карті міста, а також при перевищенні виміряним значенням обраного параметру нормального значення відбувається виведення звукового сигналу мобільним додатком у фоновому режимі та миготливого знаку на зображенні району на карті міста в додатку, який сигналізує про небезпеку в даному районі міста; натискання на цей знак виводить на екран сповіщення про те, за яким показником існує небезпека та рекомендації щодо захисту здоров'я мешканців в такому випадку.

Таким чином, підсистема моніторингу якості атмосферного повітря у кіберфізичній системі «Розумне місто» відіграє важливу роль у забезпеченні здоров'я та комфорту мешканців, а також у збереженні навколишнього середовища. Основна мета цієї підсистеми полягає у зборі, аналізі та візуалізації даних про якість повітря у місті для прийняття обґрунтованих управлінських рішень та вжиття заходів щодо зменшення забруднення та покращення якості повітря. При цьому важливо також забезпечити доступність та відкритість цих даних для широкого кола зацікавлених сторін, включаючи міську владу, дослідників, громадські організації та мешканців міста. Це сприятиме підвищенню обізнаності про проблеми забруднення повітря та сприятиме спільним зусиллям для їх

вирішення. Такий підхід до моніторингу якості атмосферного повітря в кіберфізичній системі «Розумне місто» дозволяє створити ефективну інструментальну базу для сталого розвитку та забезпечення здоров'я та комфорту мешканців.

Розроблена підсистема моніторингу якості атмосферного повітря у кіберфізичній системі «Розумне місто» може бути розвинена за рахунок виявлення джерел забруднення та їх розташування в різних районах міста, виявлення впливу забруднення атмосферного повітря на здоров'я мешканців міста / району міста, виявлення тенденцій зміни якості повітря та подальшого прогнозування якості повітря з метою розроблення стратегії для покращення якості повітря тощо. Постійне вдосконалення підсистеми моніторингу необхідно для забезпечення максимальної точності та ефективності моніторингу якості повітря. Крім цього, дуже бажаною є інтеграція даних про якість повітря з іншими системами «Розумного міста», такими як системи управління транспортом, енергетичні системи, системи управління водопостачанням тощо, для комплексного підходу до вирішення проблем забруднення довкілля та створення екологічно чистого середовища для проживання, а також для забезпечення ефективного управління міським середовищем та вжиття заходів для його покращення.

4.2 Приклади функціонування підсистеми моніторингу якості атмосферного повітря у кіберфізичній системі «Розумне місто»

Розглянемо приклади функціонування спроектованої та розробленої підсистеми моніторингу якості атмосферного повітря у кіберфізичній системі «Розумне місто».

На початку роботи із підсистемою моніторингу якості атмосферного повітря у кіберфізичній системі «Розумне місто» були задані нормальні значення параметрів повітря: вмісту пилу у повітрі ($adcth = 4 \text{ мкг/м}^3$), в т. ч. PM2.5 ($apmth = 25 \text{ мкг/м}^3$), PM10 ($apmth = 50 \text{ мкг/м}^3$), радіаційного фону повітря ($arbth = 0,1 \text{ мкЗв/год}$), рівня забруднення повітря оксидами азоту ($anoth = 40 \text{ мкг/м}^3$), рівня

забруднення повітря сіркою ($asth = 20 \text{ мкг/м}^3$), рівня забруднення повітря вуглецевими сполуками ($accth = 9 \text{ мг/м}^3$), рівня забруднення повітря парниковими газами CO ($acoth = 9 \text{ мг/м}^3$), CO₂ ($acooth = 0,04\%$), NH₃ ($anhth = 50 \text{ мкг/м}^3$), NO ($anaoth = 40 \text{ мкг/м}^3$), тобто АРТН = {4 мг/м³, 25 мкг/м³, 50 мкг/м³, 0,1 мкЗв/год, 40 мкг/м³, 20 мкг/м³, 9 мг/м³, 9 мг/м³, 0,04%, 50 мкг/м³, 40 мкг/м³}, по перевищенню яких відбувається сповіщення мешканців міста про небезпеку та надання рекомендацій щодо захисту їх здоров'я.

Обрані датчики SHT20, Nova SDS011, Radex RD1503, Figaro TGS 2600, Horiba APDA-372, SGX Sensortech MiCS-VZ-86 для вимірювання відповідно вологості повітря, температури повітря, вмісту пилу у повітрі, в т. ч. частинок PM_{2.5}, PM₁₀, радіаційного фону повітря, рівня забруднення повітря оксидами азоту, рівень забруднення повітря сіркою, рівня забруднення повітря вуглецевими сполуками, рівня забруднення повітря парниковими газами CO, CO₂, NH₃, NO розташовуються в різних районах міста Хмельницький (Озерна, Виставка, Лезневе, Заріччя, Центр, Дубове, Ракове, Книжківці, Ружична, Південно-західний, Гречани – 11 районів) для забезпечення репрезентативності та охоплення всієї території міста.

Далі щогодини виконується збір даних з встановлених датчиків, підключених у мережу Інтернету речей через обраний контролер ESP32 з використанням обраного стандарту передачі даних MQTT. Щогодини відбувається формування множин AH , AT , ADC , $APMM$, $APMT$, ARB , ANO , AS , ACC , ACO , $ACOO$, ANH , $ANA0$ по 11 елементів в кожній – на основі даних, отриманих з 11 відповідних датчиків, розташованих у 11 районах міста Хмельницький.

Так, під час експерименту на початку вимірювань були отримані наступні значення:


– множина значень вологості повітря $AH_0 = \{61\%, 61\%, 61\%, 63\%, 63\%, 62\%, 62\%, 62\%, 62\%, 61\%, 64\%\}$;

– множина значень температури повітря $AT_0 = \{+15^\circ, +15^\circ, +15^\circ, +16^\circ, +16^\circ, +16^\circ, +16^\circ, +16^\circ, +15^\circ, +15^\circ, +15^\circ\}$;

- множина значень вмісту пилу у повітрі $ADC_0 = \{2 \text{ мг/м}^3, 2 \text{ мг/м}^3, 2 \text{ мг/м}^3, 2 \text{ мг/м}^3, 3 \text{ мг/м}^3, 3 \text{ мг/м}^3, 3 \text{ мг/м}^3, 3 \text{ мг/м}^3, 2 \text{ мг/м}^3, 2 \text{ мг/м}^3, 2 \text{ мг/м}^3\}$;
- множина значень вмісту частинок $PM_{2.5}$ у повітрі $APMM_0 = \{15 \text{ мкг/м}^3, 13 \text{ мкг/м}^3, 14 \text{ мкг/м}^3, 13 \text{ мкг/м}^3, 20 \text{ мкг/м}^3, 21 \text{ мкг/м}^3, 21 \text{ мкг/м}^3, 21 \text{ мкг/м}^3, 19 \text{ мкг/м}^3, 19 \text{ мкг/м}^3, 17 \text{ мкг/м}^3\}$;
- множина значень вмісту частинок PM_{10} у повітрі $APMT_0 = \{35 \text{ мкг/м}^3, 32 \text{ мкг/м}^3, 37 \text{ мкг/м}^3, 32 \text{ мкг/м}^3, 40 \text{ мкг/м}^3, 31 \text{ мкг/м}^3, 33 \text{ мкг/м}^3, 33 \text{ мкг/м}^3, 30 \text{ мкг/м}^3, 30 \text{ мкг/м}^3, 28 \text{ мкг/м}^3\}$;
- множини значень радіаційного фону повітря $ARB_0 = \{0,05 \text{ мкЗв/год}, 0,05 \text{ мкЗв/год}, 0,05 \text{ мкЗв/год}, 0,05 \text{ мкЗв/год}, 0,04 \text{ мкЗв/год}, 0,04 \text{ мкЗв/год}, 0,045 \text{ мкЗв/год}, 0,045 \text{ мкЗв/год}, 0,035 \text{ мкЗв/год}, 0,035 \text{ мкЗв/год}, 0,035 \text{ мкЗв/год}\}$;
- множина значень рівня забруднення повітря оксидами азоту $ANO_0 = \{25 \text{ мкг/м}^3, 22 \text{ мкг/м}^3, 27 \text{ мкг/м}^3, 22 \text{ мкг/м}^3, 20 \text{ мкг/м}^3, 12 \text{ мкг/м}^3, 13 \text{ мкг/м}^3, 13 \text{ мкг/м}^3, 29 \text{ мкг/м}^3, 30 \text{ мкг/м}^3, 16 \text{ мкг/м}^3\}$;
- множина значень рівня забруднення повітря сіркою $AS_0 = \{6 \text{ мкг/м}^3, 12 \text{ мкг/м}^3, 4 \text{ мкг/м}^3, 10 \text{ мкг/м}^3, 16 \text{ мкг/м}^3, 9 \text{ мкг/м}^3, 13 \text{ мкг/м}^3, 12 \text{ мкг/м}^3, 10 \text{ мкг/м}^3, 10 \text{ мкг/м}^3, 11 \text{ мкг/м}^3\}$;
- множина значень рівня забруднення повітря вуглецевими сполуками $ACC_0 = \{8 \text{ мг/м}^3, 7 \text{ мг/м}^3, 7 \text{ мг/м}^3, 7 \text{ мг/м}^3, 6 \text{ мг/м}^3, 5 \text{ мг/м}^3, 7 \text{ мг/м}^3, 7 \text{ мг/м}^3, 7 \text{ мг/м}^3, 7 \text{ мг/м}^3, 7 \text{ мг/м}^3, 8 \text{ мг/м}^3\}$;
- множина значень рівня забруднення повітря парниковим газом CO $ACO_0 = \{7 \text{ мг/м}^3, 6 \text{ мг/м}^3, 7 \text{ мг/м}^3, 6 \text{ мг/м}^3, 8 \text{ мг/м}^3, 6 \text{ мг/м}^3, 7 \text{ мг/м}^3, 7 \text{ мг/м}^3, 8 \text{ мг/м}^3, 8 \text{ мг/м}^3, 8 \text{ мг/м}^3, 8 \text{ мг/м}^3\}$;
- множина значень рівня забруднення повітря парниковим газом CO_2 $ASCO_0 = \{0,02\%, 0,02\%, 0,02\%, 0,02\%, 0,03\%, 0,03\%, 0,03\%, 0,03\%, 0,02\%, 0,02\%, 0,02\%\}$;
- множина значень рівня забруднення повітря парниковим газом NH_3 $ANH_0 = \{38 \text{ мкг/м}^3, 30 \text{ мкг/м}^3, 33 \text{ мкг/м}^3, 30 \text{ мкг/м}^3, 43 \text{ мкг/м}^3, 41 \text{ мкг/м}^3, 43 \text{ мкг/м}^3, 42 \text{ мкг/м}^3, 32 \text{ мкг/м}^3, 30 \text{ мкг/м}^3, 38 \text{ мкг/м}^3\}$;

– множина значень рівня забруднення повітря парниковим газом NO_{ANO_0}
 $= \{25 \text{ мкг/м}^3, 23 \text{ мкг/м}^3, 27 \text{ мкг/м}^3, 23 \text{ мкг/м}^3, 31 \text{ мкг/м}^3, 32 \text{ мкг/м}^3, 32 \text{ мкг/м}^3, 30 \text{ мкг/м}^3, 26 \text{ мкг/м}^3, 24 \text{ мкг/м}^3, 28 \text{ мкг/м}^3\}$.

Далі відбувається передача зібраних даних в реальному часі із застосуванням обраного стандарту передачі даних MQTT до серверу обробки даних, на якому відбувається обробка та аналіз отриманих даних в реальному часі з використанням різних аналітичних методів з метою поточного моніторингу якості атмосферного повітря.

Відбувається візуалізація результатів моніторингу якості повітря – у вигляді карти міста з 11 районів із піктограмою  на кожному районі, при натисканні на яку користувач отримує значення всіх параметрів повітря в даному районі – рис. 4.2.

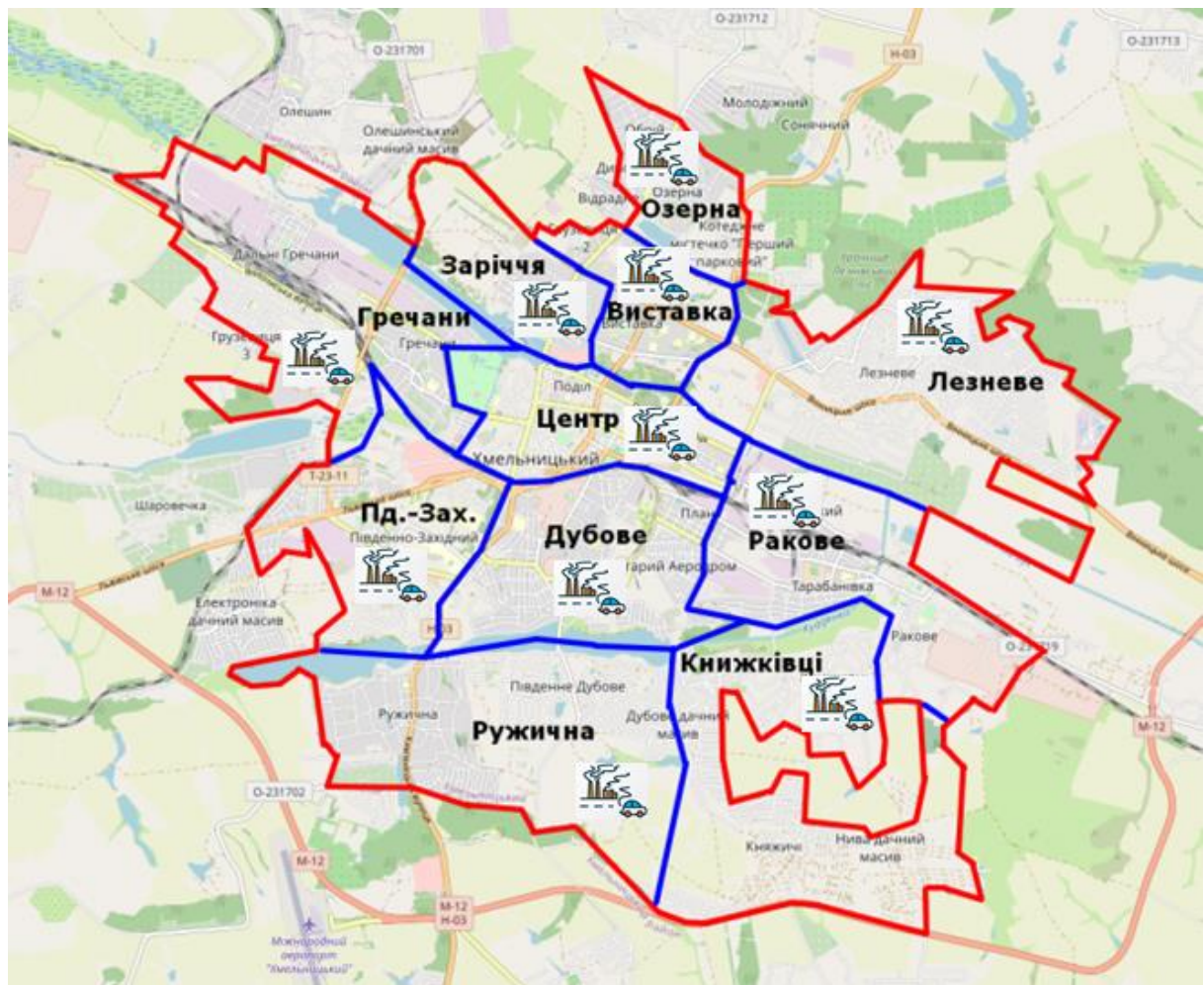


Рисунок 4.2 – Візуалізація результатів моніторингу якості повітря підсистемою моніторингу якості атмосферного повітря

На наступному кроці користувач може обрати параметри повітря, які його найбільше цікавлять – користувач може обрати від 1 до 13 вищеописаних параметрів.

Після цього підсистема моніторингу якості атмосферного повітря у кіберфізичній системі «Розумне місто» визначає, чи перевищує норму рівень забруднення повітря одним чи декількома забруднювачами, які цікавлять користувача (обрані на попередньому кроці), і виконує адаптацію візуалізації результатів моніторингу якості повітря під потреби користувача – у вигляді карти міста з 11 районів із графічним відображенням тих параметрів повітря, які цікавлять користувача.

Так, користувач підсистеми обрав параметр «вологість повітря», тому користувачу була сформована карта міста з 11 районів, на кожному з яких наведено відповідне значення вологості повітря даного району з множини значень вологості повітря AH_0 – рис. 4.3.

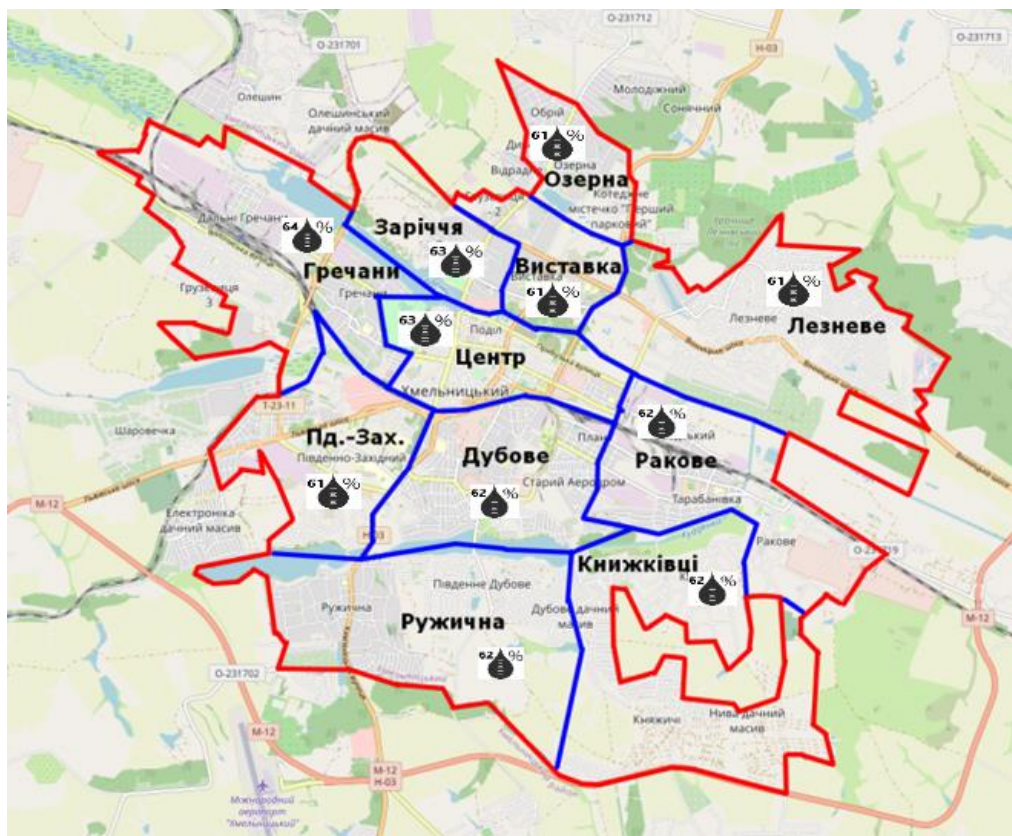


Рисунок 4.3 – Візуалізація параметру «вологість повітря» підсистемою моніторингу якості атмосферного повітря

Також користувач обрав параметр «температура повітря», тому користувачу була сформована карта міста з 11 районів, на кожному з яких наведено відповідне значення температури повітря даного району з множини значень температур повітря AT_0 – рис. 4.4.

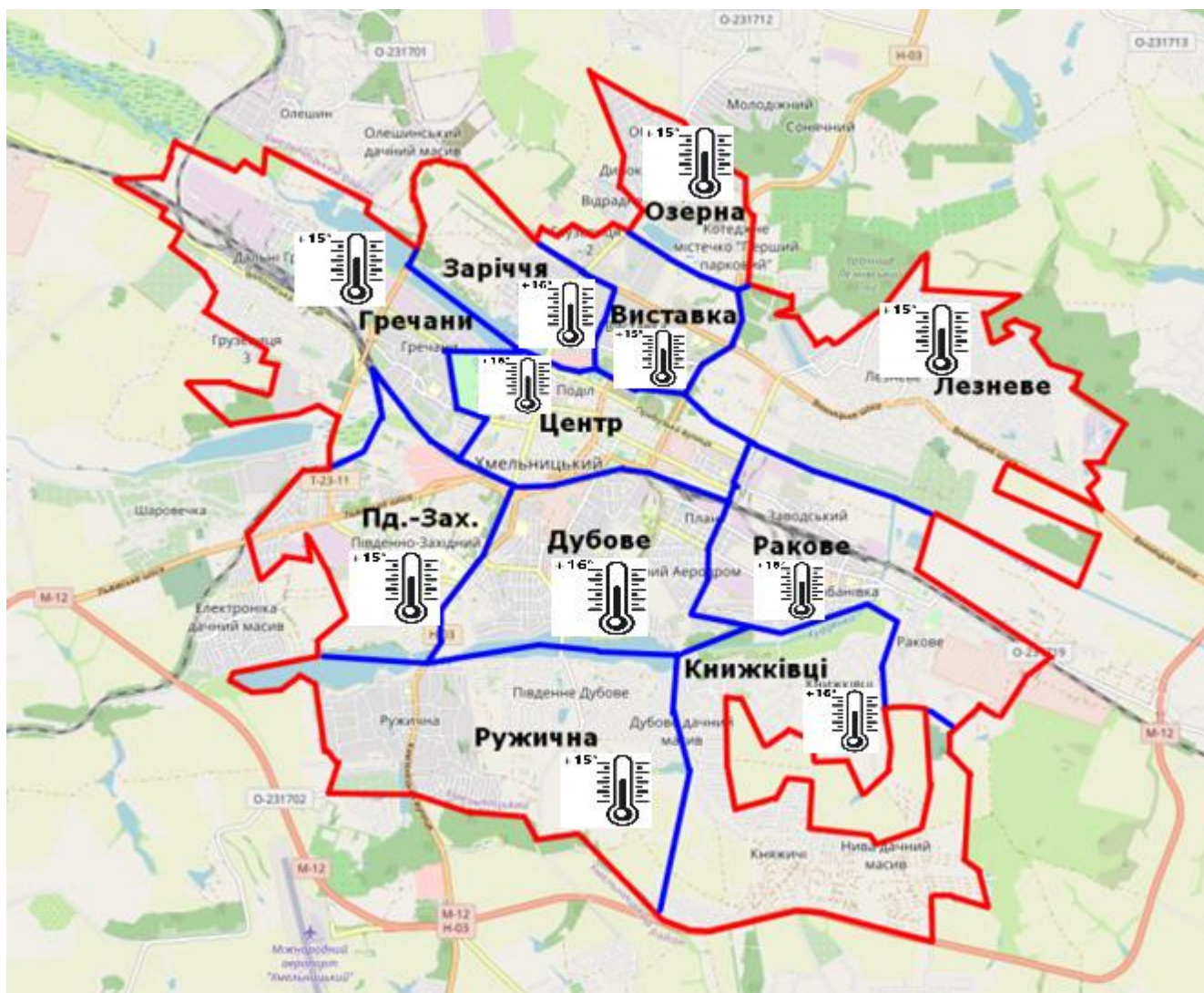


Рисунок 4.4 – Візуалізація параметру «температура повітря» підсистемою моніторингу якості атмосферного повітря

Якщо користувач обрав параметр «вміст пилу у повітрі» та/або параметр «вміст частинок $PM_{2.5}$ у повітрі» та/або параметр «вміст частинок PM_{10} у повітрі» та/або параметр «радіаційний фон повітря» та/або параметр «рівень забруднення повітря оксидами азоту» та/або параметр «рівень забруднення повітря сіркою» та/або параметр «рівень забруднення повітря вуглецевими сполуками» та/або

параметр «рівень забруднення повітря парниковим газом CO» та/або параметр «рівень забруднення повітря парниковим газом CO₂» та/або параметр «рівень забруднення повітря парниковим газом NH₃» та/або параметр «рівень забруднення повітря парниковим газом NO», то користувачу формується карта міста Хмельницький з 11 районів, на кожному з яких наведено відповідне значення вмісту пилу у повітрі даного району з множини значень вмісту пилу у повітрі ADC_0 та/або відповідне значення вмісту частинок PM_{2.5} у повітрі даного району з множини значень вмісту частинок PM_{2.5} у повітрі $APMM_0$ та/або відповідне значення вмісту частинок PM₁₀ у повітрі даного району з множини значень вмісту частинок PM₁₀ у повітрі $APMT_0$ та/або відповідне значення радіаційного фону повітря даного району з множини значень радіаційного фону повітря ARB_0 та/або відповідне значення рівня забруднення оксидами азоту повітря даного району з множини значень рівня забруднення повітря оксидами азоту ANO_0 та/або відповідне значення рівня забруднення сіркою повітря даного району з множини значень рівня забруднення повітря сіркою AS_0 та/або відповідне значення рівня забруднення вуглецевими сполуками повітря даного району з множини значень рівня забруднення повітря вуглецевими сполуками ACC_0 та/або відповідне значення рівня забруднення парниковим газом CO повітря даного району з множини значень рівня забруднення парниковим газом CO ACO_0 та/або відповідне значення рівня забруднення парниковим газом CO₂ повітря даного району з множини значень рівня забруднення парниковим газом CO₂ $ACOO_0$ та/або відповідне значення рівня забруднення парниковим газом NH₃ повітря даного району з множини значень рівня забруднення парниковим газом NH₃ ANH_0 та/або відповідне значення рівня забруднення парниковим газом NO повітря даного району з множини значень рівня забруднення парниковим газом NO ANA_0 .

Також користувач обрав параметр «вміст пилу у повітрі», тому користувачу була сформована карта міста з 11 районів, на кожному з яких наведено відповідне значення вмісту пилу у повітрі даного району з множини значень вмісту пилу у повітрі ADC_0 – рис. 4.5.

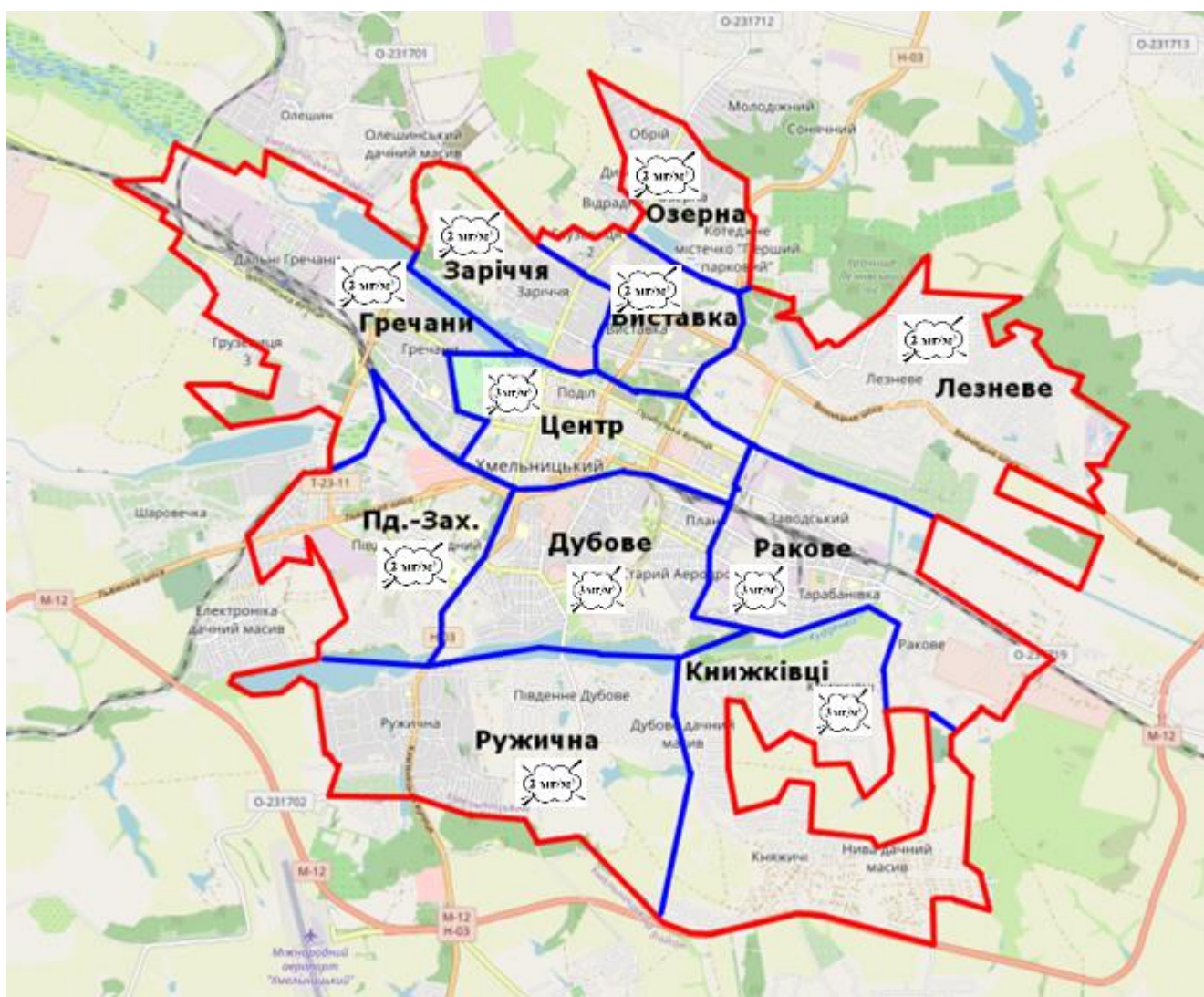





Рисунок 4.5 – Візуалізація параметру «вміст пилу у повітрі» підсистемою моніторингу якості атмосферного повітря на початку вимірювань

Крім цього, якщо значення жодного з обраних користувачем параметрів повітря (серед параметрів «вміст пилу у повітрі», «вміст частинок PM2.5 у повітрі», «вміст частинок PM10 у повітрі», «радіаційний фон повітря», «рівень забруднення повітря оксидами азоту», «рівень забруднення повітря сіркою», «рівень забруднення повітря вуглецевими сполуками», «рівень забруднення повітря парниковим газом CO», «рівень забруднення повітря парниковим газом CO₂», «рівень забруднення повітря парниковим газом NH₃», «рівень забруднення повітря парниковим газом NO») не перевищує норму у *i*-му районі міста, то відбувається візуалізація у вигляді миготливого знаку  над *i*-м районом міста, який

сигналізує про те, що забруднення повітря в *i*-му районі за обраними показниками не перевищує норму, або у вигляді звукового сигналу та миготливого знаку , який сигналізує про небезпеку в *i*-му районі міста, натискання на цей знак виводить на екран сповіщення щодо того, який показник перевищує норму, та рекомендації щодо захисту здоров'я мешканців в такому випадку.

Оскільки обраний користувачем параметр «вміст пилу у повітрі» не перевищує норму у жодному районі міста Хмельницький на початку вимірювання, то відбувається візуалізація у вигляді миготливого знаку  над кожним районом міста – рис. 4.6.

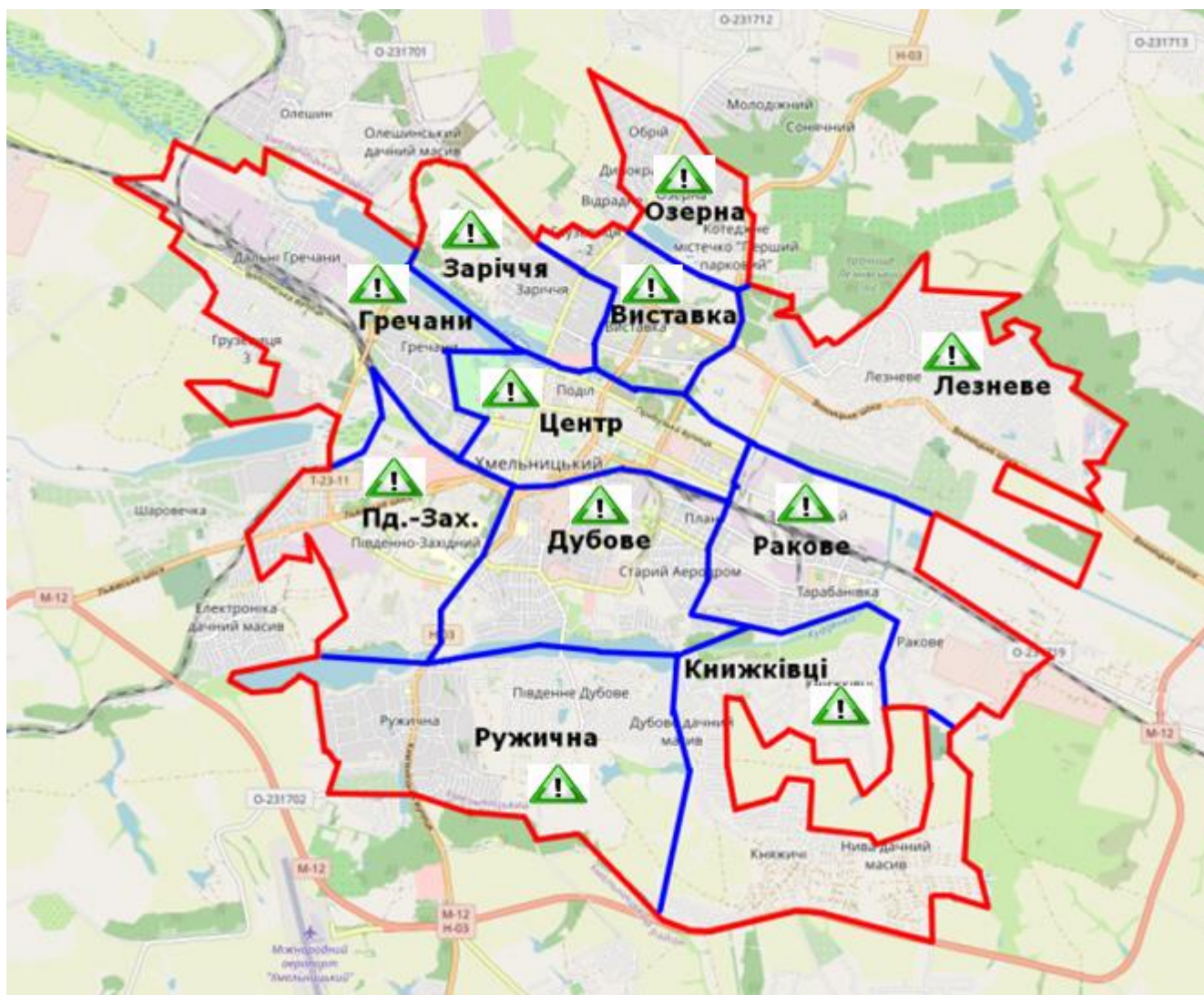


Рисунок 4.6 – Візуалізація, що забруднення повітря за показником «вміст пилу у повітрі» не перевищує норму на початку вимірювань

Аналогічні дії виконуються щогодини.

Через 15 годин роботи підсистеми моніторингу якості атмосферного повітря кіберфізичної системи «Розумне місто» множина значень вмісту пилу у повітрі мала наступний вигляд (оскільки в місті почалась пилова буря з піском з Сахари): $ADC_{15} = \{7 \text{ мг/м}^3, 7 \text{ мг/м}^3, 7 \text{ мг/м}^3, 7 \text{ мг/м}^3, 6 \text{ мг/м}^3, 6 \text{ мг/м}^3, 6 \text{ мг/м}^3, 6 \text{ мг/м}^3, 6 \text{ мг/м}^3, 6 \text{ мг/м}^3, 7 \text{ мг/м}^3\}$. Оскільки користувач не змінював вибору параметру «вміст пилу у повітрі», тому користувачу була сформована карта міста з 11 районів, на кожному з яких наведено відповідне значення вмісту пилу у повітрі даного району з множини значень вмісту пилу у повітрі ADC_{15} – рис. 4.7.

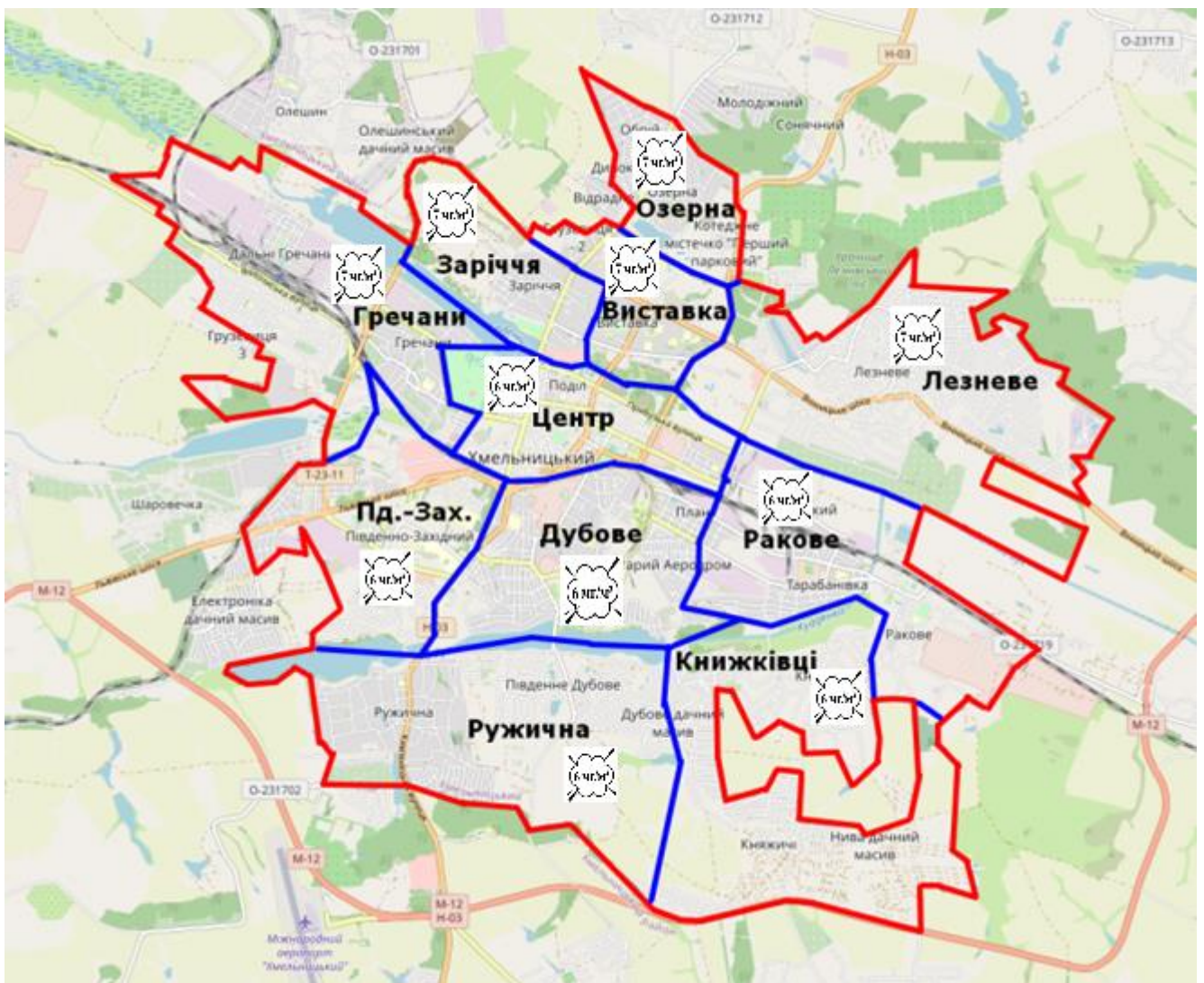



Рисунок 4.7 – Візуалізація параметру «вміст пилу у повітрі» підсистемою моніторингу якості атмосферного повітря через 15 годин роботи

Оскільки обраний користувачем параметр «вміст пилу у повітрі» через 15 годин роботи перевищив норму у кожному районі міста Хмельницький внаслідок пилової бурі з піском з Сахари, то мобільний додаток, який працює в фоновому режимі, видав звуковий сигнал, а на зображенні кожного району на карті міста в додатку з'явився миготливий знак , який сигналізує про небезпеку, натискання на цей знак виводить на екран сповіщення: «Вміст пилу у повітрі перевищує норму» та рекомендації щодо захисту здоров'я мешканців в такому випадку (рис. 4.8).

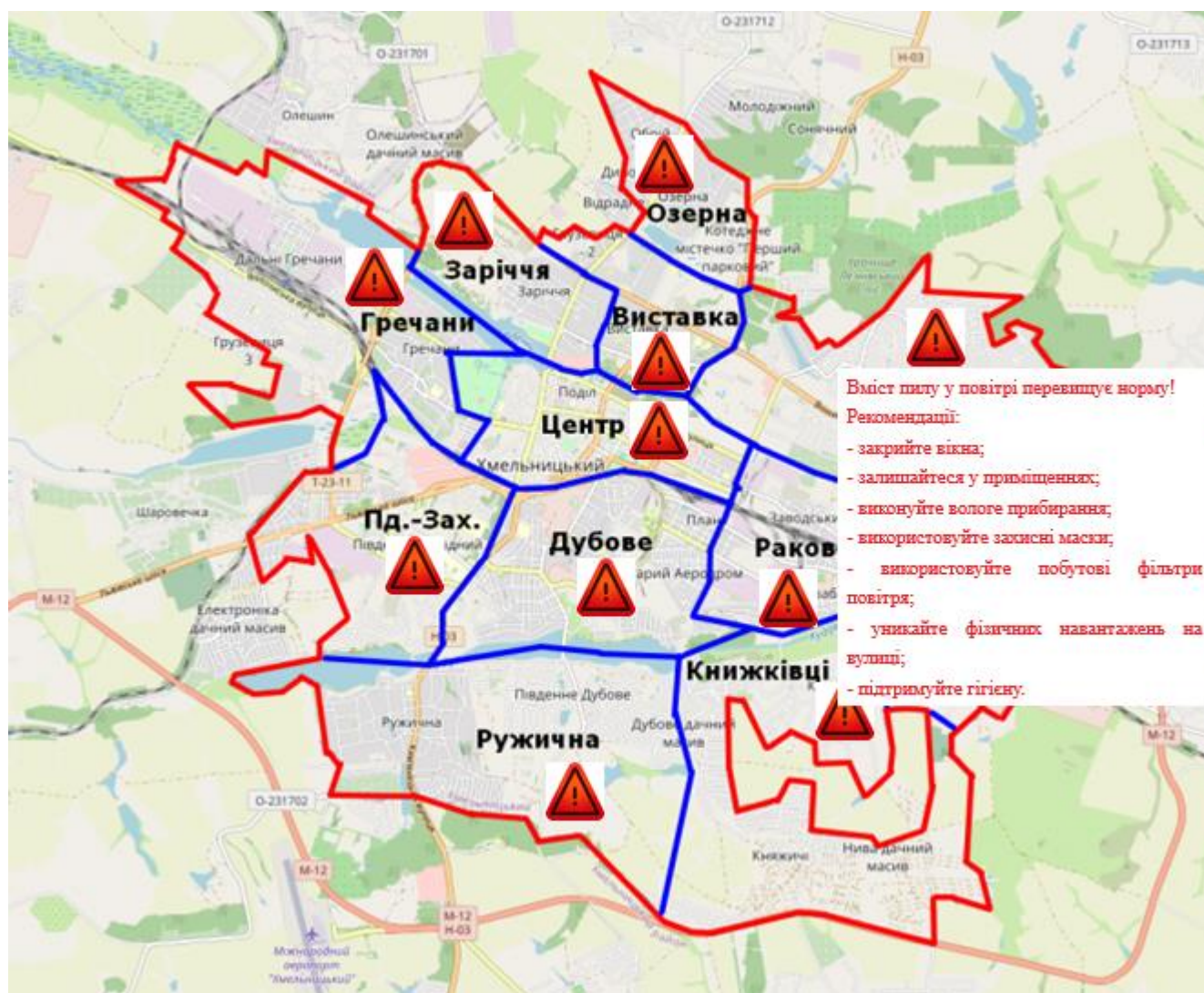


Рисунок 4.8 – Візуалізація, що забруднення повітря за показником «вміст пилу у повітрі» перевищує норму через 15 годин роботи, та рекомендації щодо захисту здоров'я мешканців

4.3 Висновки

В розділі 4 кваліфікаційної роботи вперше розроблено архітектуру підсистеми моніторингу якості атмосферного повітря у кіберфізичній системі «Розумне місто». Розроблена підсистема моніторингу якості атмосферного повітря у кіберфізичній системі «Розумне місто» виконує збір даних з встановлених датчиків вологості повітря, температури повітря, вмісту пилу у повітрі, в т. ч. частинок PM2.5, PM10, радіаційного фону повітря, рівня забруднення повітря оксидами азоту, рівня забруднення повітря сіркою, рівня забруднення повітря вуглецевими сполуками, рівня забруднення повітря парниковими газами CO, CO₂, NH₃, NO, передачу зібраних даних в реальному часі до сервера обробки даних, обробку та аналіз отриманих даних в реальному часі з використанням різних аналітичних методів, візуалізацію результатів моніторингу якості повітря у вигляді карти міста з n районів із відображенням всіх параметрів повітря. Користувач в мобільному додатку кіберфізичної системи може виконати вибір параметрів повітря, які його цікавлять. Після вибору таких параметрів відбувається адаптація візуалізації результатів моніторингу якості повітря під потреби користувача – відбувається виведення виміряного значення обраного користувачем параметру на зображенні району на карті міста, а також відбувається виведення звукового сигналу мобільним додатком у фоновому режимі та миготливого знаку на зображенні району на карті міста в додатку, який сигналізує про небезпеку в даному районі міста; натискання на цей знак виводить на екран сповіщення про те, за яким показником існує небезпека та рекомендації щодо захисту здоров'я мешканців в такому випадку.

ВИСНОВКИ

У роботі за результатами виконаних теоретичних та практичних досліджень забезпечено моніторинг якості атмосферного повітря, зокрема, автоматичний контроль за рівнем вологості, температури, вмісту пилу, в тому числі частинок PM2.5, PM10, радіаційного фону, забруднення оксидами азоту, сіркою, вуглецевими сполуками, парниковими газами типу CO, CO₂, NH₃, NO тощо, а також інших шкідливих речовин.

У першому розділі проведений аналіз відомих методів та рішень для моніторингу якості атмосферного повітря у кіберфізичній системі «Розумне місто», зокрема, проаналізовано кіберфізичні системи «Розумне місто», а також відомі рішення моніторингу якості атмосферного повітря.

У розділі 2 кваліфікаційної роботи виконано вибір датчиків для формування нижнього рівня підсистеми моніторингу якості атмосферного повітря кіберфізичної системи «Розумне місто». Оскільки ціна проаналізованих датчиків вимірювання вологості та температури приблизно однакова, то для підсистеми обрано датчик SHT20, який має високу точність, а також працює на екстремальних вологості та температурах, що важливо, враховуючи його вуличне використання у підсистемі моніторингу якості атмосферного повітря кіберфізичної системи «Розумне місто». Оскільки ціна проаналізованих датчиків вмісту пилу у повітрі суттєво різниться, то для підсистеми моніторингу якості атмосферного повітря кіберфізичної системи «Розумне місто» обрано датчик Nova SDS011, який має високу точність, а також вимірює концентрацію частинок PM2.5, PM10 дрібнодисперсного пилу, які є однією з найбільш шкідливих форм забруднення повітря. Враховуючи особливості та призначення підсистеми моніторингу якості атмосферного повітря кіберфізичної системи «Розумне місто», для вимірювання радіаційного фону повітря обрано датчик Radex RD1503, який є компактним і відносно недорогим, для вимірювання рівнів різних оксидів азоту NO_x обрано датчик Figaro TGS 2600, який є відносно недорогим, для вимірювання рівня сірки та вуглеводнів обрано датчик Horiba APDA-372, для вимірювання рівня

парникових газів обрано датчик SGX Sensortech MiCS-VZ-86. Крім цього, у розділі 2 кваліфікаційної роботи виконано вибір контролера для формування середнього рівня підсистеми моніторингу якості атмосферного повітря кіберфізичної системи «Розумне місто». Враховуючи характеристики та вартість різних IoT-контролерів, для підсистеми моніторингу якості атмосферного повітря кіберфізичної системи «Розумне місто» обрано контролер ESP32. Також у розділі 2 кваліфікаційної роботи виконано вибір стандарту для передачі даних для налагодження зв'язку між компонентами всіх трьох рівнів підсистеми моніторингу якості атмосферного повітря кіберфізичної системи «Розумне місто» – обрано стандарт для передачі даних MQTT.

Враховуючи визначені забруднювачі атмосферного повітря, які будуть в фокусі уваги процесу моніторингу якості атмосферного повітря у кіберфізичній системі «Розумне місто», в розділі 2 кваліфікаційної роботи розроблені критерій забруднення повітря пилом, критерій забруднення повітря частинками PM_{2.5}, критерій забруднення повітря частинками PM₁₀, критерій підвищеного радіаційного фону повітря, критерій забруднення повітря оксидами азоту, критерій забруднення повітря сіркою та сірчаними сполуками, критерій забруднення повітря вуглецевими сполуками, критерій забруднення повітря парниковим газом CO, критерій забруднення повітря парниковим газом CO₂, критерій забруднення повітря парниковим газом NH₃, критерій забруднення повітря парниковим газом NO, а також загальне правило для прийняття рішення щодо перевищення/неперевищення норми рівня забруднення повітря одним чи декількома забруднювачами.

В розділі 3 кваліфікаційної роботи розроблений метод моніторингу якості атмосферного повітря у кіберфізичній системі «Розумне місто», який становить основу для ефективного моніторингу якості атмосферного повітря у кіберфізичній системі «Розумне місто» і дозволяє приймати обґрунтовані рішення щодо сповіщення мешканців про небезпеку із наданням рекомендацій щодо захисту їх здоров'я. Використання такого методу моніторингу дозволяє містам отримувати точну та актуальну інформацію про якість повітря, що є важливим кроком для прийняття стратегічних рішень з метою зменшення забруднення та покращення

якості довкілля. Більш того, надані методом дані можуть бути використані для розробки та впровадження ефективних програм та проєктів з міського планування, транспортної інфраструктури, енергоефективності та інших аспектів життя містян.

Крім цього, в розділі 3 кваліфікаційної роботи розроблено алгоритм моніторингу якості атмосферного повітря у кіберфізичній системі «Розумне місто», за яким виконуватиметься постійний моніторинг якості повітря, визначатиметься, чи перевищує норму рівень забруднення повітря одним чи декількома забруднювачами, які цікавлять користувача, відобразатимуться (у візуальному вигляді) рівні забруднення різними забруднювачами повітря різних районів міста тощо, а також відбуватиметься оперативне повідомлення містян про перевищення норми рівня забруднення повітря одним чи декількома забруднювачами. Цей алгоритм дозволяє приймати ефективні заходи для покращення середовища проживання. Він забезпечує комплексний підхід до моніторингу та управління якістю повітря у місті, що дозволяє забезпечити безпеку та комфорт для мешканців та зберегти навколишнє середовище для майбутніх поколінь.

В розділі 4 кваліфікаційної роботи вперше розроблено архітектуру підсистеми моніторингу якості атмосферного повітря у кіберфізичній системі «Розумне місто». Розроблена підсистема моніторингу якості атмосферного повітря у кіберфізичній системі «Розумне місто» виконує збір даних з встановлених датчиків вологості повітря, температури повітря, вмісту пилу у повітрі, в т. ч. частинок PM2.5, PM10, радіаційного фону повітря, рівня забруднення повітря оксидами азоту, рівня забруднення повітря сіркою, рівня забруднення повітря вуглецевими сполуками, рівня забруднення повітря парниковими газами CO, CO₂, NH₃, NO, передачу зібраних даних в реальному часі до сервера обробки даних, обробку та аналіз отриманих даних в реальному часі з використанням різних аналітичних методів, візуалізацію результатів моніторингу якості повітря у вигляді карти міста з n районів із відображенням всіх параметрів повітря. Користувач в мобільному додатку кіберфізичної системи може виконати вибір параметрів повітря, які його цікавлять. Після вибору таких параметрів відбувається адаптація візуалізації результатів моніторингу якості повітря під потреби користувача –

відбувається виведення виміряного значення обраного користувачем параметру на зображенні району на карті міста, а також відбувається виведення звукового сигналу мобільним додатком у фоновому режимі та миготливого знаку на зображенні району на карті міста в додатку, який сигналізує про небезпеку в даному районі міста; натискання на цей знак виводить на екран сповіщення про те, за яким показником існує небезпека та рекомендації щодо захисту здоров'я мешканців в такому випадку.

Наукова новизна отриманих результатів:

1) вперше розроблено метод моніторингу якості атмосферного повітря у кіберфізичній системі «Розумне місто», який відрізняється від відомих своєю орієнтованістю на реалізацію у вигляді підсистеми ефективного моніторингу якості атмосферного повітря у кіберфізичній системі «Розумне місто» і надає точну та актуальну інформацію про якість повітря, а також дозволяє приймати обґрунтовані рішення щодо сповіщення мешканців про небезпеку із наданням рекомендацій щодо захисту їх здоров'я;

2) вперше розроблено архітектуру підсистеми моніторингу якості атмосферного повітря у кіберфізичній системі «Розумне місто», яка відрізняється від відомих нижчою ціною, вищою точністю, простотою у використанні та виконує збір даних з встановлених датчиків вимірювання параметрів повітря, обробку та аналіз отриманих даних в реальному часі, візуалізацію результатів моніторингу якості повітря у вигляді карти міста з n районів із відображенням всіх параметрів повітря з адаптацією візуалізації результатів під потреби користувача, а також сигналізацію про небезпеку в даному районі міста із наданням рекомендацій щодо захисту здоров'я мешканців в такому випадку.

Практична значущість отриманих результатів полягає у реалізації підсистеми моніторингу якості атмосферного повітря у кіберфізичній системі «Розумне місто», яка забезпечує збір даних з встановлених датчиків, візуалізацію результатів моніторингу якості повітря та сигналізацію про небезпеку в даному районі міста із наданням рекомендацій щодо захисту здоров'я мешканців в такому випадку.

За темою кваліфікаційної роботи опублікована одна стаття у фаховому науковому виданні України категорії Б:

1) Т. Новорущенко, V. Baranovskyi, O. Ivanov, A. Hnatchuk. Subsystem for monitoring atmospheric air quality in the cyber-physical system “Smart city”. Computer systems and information technologies. 2024. №1.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. A new framework for assessment of park management in smart cities: a study based on social media data and deep learning / S. Liu et al. *Scientific Reports*. 2024. Vol. 14, no. 1.
2. A vehicular network based intelligent transport system for smart cities using machine learning algorithms / J. Prakash et al. *Scientific Reports*. 2024. Vol. 14, no. 1.
3. CSR and smart city progress: a proposed model for urban development / K. Singh et al. *Letters in Spatial and Resource Sciences*. 2023. Vol. 17, no. 1.
4. Hovorushchenko T. O., Aleksov S. V., Talapchuk S. I., Shpylyuk O. V., Magdin V. V. Overview of the Methods and Tools for Situation Identification and Decision-Making Support in the Cyberphysical System "Smart House". *Computer Systems & Information Technologies*. 2022. №4. Pp. 20-26.
5. Sustainable open data ecosystems in smart cities: A platform theory-based analysis of 19 European cities / M. Lnenicka et al. *Cities*. 2024. Vol. 148. P. 104851.
6. Air Quality Hotspot Monitoring with Trajectories of IoT in Smart City Implementation / S. C. Bhangale et al. *2023 3rd International Conference on Pervasive Computing and Social Networking (ICPCSN)*, Salem, India, 19–20 June 2023. 2023.
7. Holubčik M., Jandačka J., Nicolanská M. Improvement of Emission Monitoring System Accuracy in Aims of Increasing Air Quality of Smart City. *Mobile Networks and Applications*. 2023.
8. Das S., Alzimami A. Bayesian Optimization based Hyperparameter Tuning of Ensemble Regression Models in Smart City Air Quality Monitoring Data Analytics. *2023 1st International Conference on Advanced Innovations in Smart Cities (ICAISC)*, Jeddah, Saudi Arabia, 23–25 January 2023. 2023.
9. Designing Air Quality Monitoring Systems in Smart Cities / A. Marini et al. *Communications in Computer and Information Science*. Cham, 2022. P. 3–20.
10. Verma H., Prabhu S. Implementation Of IoT and Applications in Smart City in Achieving the Smart Environment. *2023 Second International Conference on Augmented Intelligence and Sustainable Systems (ICAISS)*, Trichy, India, 23–25 August 2023. 2023.

11. Smart and Portable Air-Quality Monitoring IoT Low-Cost Devices in Ibarra City, Ecuador / V. E. Alvear-Puertas et al. *Sensors*. 2022. Vol. 22, no. 18. P. 7015.

12. Tancev G., Toro F. G. Towards a Digital Twin for Air Quality Monitoring Networks in Smart Cities. *2022 IEEE International Smart Cities Conference (ISC2)*, Pafos, Cyprus, 26–29 September 2022. 2022.

13. Performance Analysis of LoRaWAN in an Air Quality Monitoring Applications for Smart Cities / A. F. da S. Veloso et al. *2021 6th International Conference on Smart and Sustainable Technologies (SpliTech)*, Bol and Split, Croatia, 8–11 September 2021. 2021.

14. Jiang X. Large Scale Air-Quality Monitoring in Smart and Sustainable Cities. *Smart Cities*. Hoboken, NJ, USA, 2017. P. 725–753.

15. Ji C., Niu Y. A hybrid evolutionary and machine learning approach for smart city planning: Digital twin approach. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. 2024. Vol. 64. P. 103650.

16. Kim J. S., Feng Y. Understanding complex viewpoints in smart sustainable cities: The experience of Suzhou, China. *Cities*. 2024. Vol. 147. P. 104832.

17. Chen C., Li S.-E., Wang L. Can smart cities reduce labor misallocation? Evidence from China. *Technological Forecasting and Social Change*. 2024. Vol. 201. P. 123264.

18. Experts and intelligent systems for smart homes' Transformation to Sustainable Smart Cities: A comprehensive review / N. U. Huda et al. *Expert Systems with Applications*. 2024. Vol. 238. P. 122380.

19. Zheng X., Li M., Guo J. Task scheduling using edge computing system in smart city. *International Journal of Communication Systems*. 2020. P. e4422.

20. Shiu S. C.-o. Ageing in a smart city poses concerns on sustainability from a model perspective. *Aging and Health Research*. 2024. P. 100179.

21. Concept of Intelligent Measuring System for Analyzing the Energy Consumption of IoT Modules / A. Sachenko et al. *Computer systems and information technologies*. 2022. No. 4. P. 101–105.

22. Active smart switchable glazing for smart city: A review / A. Ghosh et al. *Journal of Building Engineering*. 2024. P. 108644.
23. Pavlova O., Kovalenko V., Hovorushchenko T., Avsiyevych V. Neural network based image recognition method for smart parking. *Computer Systems and Information Technologies*. 2021. №1. Pp. 49-55.
24. Kesar P., Ache (Peter) P. M. Past, present and future of the Smart City in India: An institutional perspective. *Cities*. 2024. Vol. 146. P. 104775.
25. Smart cities and sustainable development goals (SDGs): A systematic literature review of co-benefits and trade-offs / A. Sharifi et al. *Cities*. 2024. Vol. 146. P. 104659.
26. Boyle D. E., Yates D. C., Yeatman E. M. Urban Sensor Data Streams: London 2013. *IEEE Internet Computing*. 2013. Vol. 17, no. 6. P. 12–20.
27. Paskaleva K. A. Enabling the smart city: the progress of city e-governance in Europe. *International Journal of Innovation and Regional Development*. 2019. Vol. 1, no. 4. P. 405.
28. Shaping Europe’s digital future: Commission presents new initiatives for digital infrastructures of tomorrow. URL: <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en>.
29. Smart cities: Digital technologies make smart cities more liveable, sustainable and prosperous. URL: <https://www.arup.com/services/planning/smart-cities>.
30. MK Data Hub. URL: <https://datahub.mksmart.org/>.
31. SmartCities card. URL: <https://www.southampton.gov.uk/roads-parking/travel/smartcities-card/>.
32. City of Amsterdam: Digitalization & Innovation. URL: <https://amsterdamsmartcity.com/organisations/digitalization-innovation>.
33. Barcelona Digital City. URL: <https://ajuntament.barcelona.cat/digital/en>.
34. Stockholm Smart City. URL: <https://nscn.eu/Stockholm>.
35. How Tel Aviv Became One of the World's Smartest Cities. URL: <https://www.iotworldtoday.com/smart-cities/how-tel-aviv-became-one-of-the-world-s-smartest-cities>.
36. Puttkamer L. City Portrait: Smart City Copenhagen. URL: <https://www.beesmart.city/en/smart-city-blog/copenhagen>.

37. Help make Milton Keynes a smarter, greener city. URL: <https://ourmk.org/>.
38. Singapore: the world's smartest city. URL: <https://www.thalesgroup.com/en/worldwide-digital-identity-and-security/iot/magazine/singapore-worlds-smartest-city>.
39. Toronto's Smart City: Our Fight For Privacy. URL: <https://ccla.org/major-cases-and-reports/torontos-smart-city/>.
40. Kyiv Smart City. URL: <https://smartcitykyiv.com/>.
41. Smart city case study: Santander, Spain. URL: <https://www.rcrwireless.com/20170116/fundamentals/smart-city-case-study-santander-tag23-tag99>.
42. Sydney a smart city? URL: <https://www.arup.com/perspectives/sydney-a-smart-city>.
43. Exploring role-playing as a tool for involving citizens in air pollution mitigation urban policies / À. Boso et al. *Humanities and Social Sciences Communications*. 2024. Vol. 11, no. 1.
44. Effects of weather and air pollution on outpatient visits for insect-and-mite-caused dermatitis: an empirical and predictive analysis / M. Xiong et al. *BMC Public Health*. 2024. Vol. 24, no. 1.
45. Development of a greenhouse gas - air pollution interactions and synergies model for Korea (GAINS-Korea) / J.-H. Woo et al. *Scientific Reports*. 2024. Vol. 14, no. 1.
46. Zareba M., Weglinska E., Danek T. Air pollution seasons in urban moderate climate areas through big data analytics. *Scientific Reports*. 2024. Vol. 14, no. 1.
47. Exposure to air pollution and ovarian reserve parameters / K. Wieczorek et al. *Scientific Reports*. 2024. Vol. 14, no. 1.
48. Numerical simulation of the dust pollution characteristics and the optimal dustproof air volume in coal washing plant screening workshop / W. Nie et al. *Journal of Building Engineering*. 2024. P. 109025.
49. Air pollution and serious bleeding events in high-risk older adults / R. Fayyad et al. *Environmental Research*. 2024. P. 118628.

50. Ambient air pollution and Children's health: An umbrella review / K. Liu et al. *Atmospheric Pollution Research*. 2024. P. 102108.
51. Forecasting urban air pollution using multi-site spatiotemporal data fusion method (Geo-BiLSTMA) / T. Jia et al. *Atmospheric Pollution Research*. 2024. Vol. 15, no. 6. P. 102107.
52. Improving air pollution awareness of the general public through citizen science approach / K. Abhijith et al. *Sustainable Horizons*. 2024. Vol. 10. P. 100086.
53. Using dispersion models at microscale to assess long-term air pollution in urban hot spots: A FAIRMODE joint intercomparison exercise for a case study in Antwerp / F. Martín et al. *Science of The Total Environment*. 2024. Vol. 925. P. 171761.
54. Impact of single and combined local air pollution mitigation measures in an urban environment / J. L. Santiago et al. *Science of The Total Environment*. 2024. P. 171441.
55. Increasing impacts of fire air pollution on public and ecosystem health / X. Yue et al. *The Innovation*. 2024. P. 100609.
56. Methodology for designing air quality monitoring networks: I. Theoretical aspects / M. K. Liu et al. *Environmental Monitoring and Assessment*. 2016. Vol. 6, no. 1. P. 1–11.
57. Air Quality Monitoring Using Statistical Learning Models for Sustainable Environment / M. Imam et al. *Intelligent Systems with Applications*. 2024. P. 200333.
58. Mahmood T. Generalized linear modelling based monitoring methods for air quality surveillance. *Journal of King Saud University - Science*. 2024. P. 103145.
59. An integrated strategy for air quality monitoring and management in industrial port areas / M. López et al. *Cleaner Engineering and Technology*. 2024. P. 100729.
60. Ajnoti N., Gehlot H., Tripathi S. N. Hybrid instrument network optimization for air quality monitoring. *Atmospheric Measurement Techniques*. 2024. Vol. 17, no. 6. P. 1651–1664.
61. Xie X., Qian N., Qiu P. Online monitoring of air quality using PCA-based sequential learning. *The Annals of Applied Statistics*. 2024. Vol. 18, no. 1.
62. Intelligent coverage and cost-effective monitoring: Bus-based mobile sensing for city air quality / M. Huang et al. *Computers, Environment and Urban Systems*. 2024. Vol. 108. P. 102073.

63. Surveillance-image-based outdoor air quality monitoring / X. Wang et al. *Environmental Science and Ecotechnology*. 2023. P. 100319.
64. Solutions to Improve Performance of IoT-Based Air Quality Monitoring System to Achieve The Sustainable Development Goals in Indonesian / J. Kustija et al. *E3S Web of Conferences*. 2024. Vol. 484. P. 03006.
65. Intelligent, low-cost, high-performance system for environmental air quality monitoring through integrated gas, temperature, and humidity analysis / P. F. C. de Marinho et al. *International Journal of Environmental Science and Technology*. 2023.
66. Validation of low-cost air quality monitoring platforms using model-based control charts / M. Boulic et al. *Journal of Building Engineering*. 2023. P. 108357.
67. Shakhov V. An Approach for Design of Air Quality Monitoring Systems. *E3S Web of Conferences*. 2024. Vol. 496. P. 04002.
68. Determining factors affecting the perceived usability of air pollution detection mobile application “AirVisual” in Thailand: A structural equation model forest classifier approach / A. K. S. Ong et al. *Heliyon*. 2022. P. e12538.
69. IQAir AirVisual | Air Quality. URL: <https://apps.apple.com/ua/app/iqair-airvisual-air-quality/id1048912974?l=uk>.
70. AirVisual. URL: <https://www.saveecobot.com/platform/airvisual>.
71. PurpleAir: Hyper-Local, Real-Time Air Quality Data for Everyone. URL: <https://www2.purpleair.com/>.
72. Ko K., Cho S., Rao R. R. Performance Evaluation of Low-cost PurpleAir Sensors in Ambient Air. *2020 IEEE 7th International Conference on Data Science and Advanced Analytics (DSAA)*, Sydney, Australia, 6–9 October 2020. 2020.
73. An evaluation of the U.S. EPA's correction equation for PurpleAir sensor data in smoke, dust, and wintertime urban pollution events / D. A. Jaffe et al. *Atmospheric Measurement Techniques*. 2023. Vol. 16, no. 5. P. 1311–1322.
74. Farooqui Z., Biswas J., Saha J. Long-Term Assessment of PurpleAir Low-Cost Sensor for PM_{2.5} in California, USA. *Pollutants*. 2023. Vol. 3, no. 4. P. 477–493.
75. Ambient characterisation of PurpleAir particulate matter monitors in terms of indicative measurements / A. Caseiro et al. *Environmental Science: Atmospheres*. 2022.

76. IQAir AirVisual Pro. URL: <https://www.iqair.com/products/air-quality-monitors/airvisual-pro-indoor-monitor>.

77. Zamora M. L., Rice J., Koehler K. One year evaluation of three low-cost PM_{2.5} monitors. *Atmospheric Environment*. 2020. Vol. 235. P. 117615.

78. Aeroqual Cloud: Air Quality Monitoring Software. URL: <https://www.aeroqual.com/air-monitoring-software/air-quality-monitoring-software>.

79. Patwardhan I., Sara S., Chaudhari S. Comparative Evaluation of New Low-Cost Particulate Matter Sensors. *2021 8th International Conference on Future Internet of Things and Cloud (FiCloud)*, Rome, Italy, 23–25 August 2021. 2021.

80. Evaluating the Performance of Low-Cost Air Quality Monitors in Dallas, Texas / H. Khreis et al. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2022. Vol. 19, no. 3. P. 1647.

81. Field evaluation of a low-cost indoor air quality monitor to quantify exposure to pollutants in residential environments / A. Moreno-Rangel et al. *Journal of Sensors and Sensor Systems*. 2018. Vol. 7, no. 1. P. 373–388.

82. Foobot Indoor Air Quality Monitor. URL: <https://revoit-asia.com/products/foobot-indoor-air-quality-monitor>.

83. Foobot API Client Documentation. URL: <https://readthedocs.org/projects/foobot-async/downloads/pdf/latest/>.

84. Dye T. S., Chan A. C., Anderson C. B., Strohm D. E., Wayland R. A., White J. E. From raw air quality data to the nightly news: An overview of how EPA's AIRNow program operates. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 2014. P. 6597 – 6601.

85. FUTURE OF AIRNOW AND THE AIR QUALITY INDEX: BEYOND OZONE MAPPING AND FORECASTING. URL: <https://archive.epa.gov/international/air/web/pdf/airnow-epa.pdf>.

86. FROM RAW AIR QUALITY DATA TO THE NIGHTLY NEWS: AN OVERVIEW OF HOW EPA'S AIRNOW PROGRAM OPERATES. URL: <https://archive.epa.gov/international/air/web/pdf/airnow.pdf>.

87. Upcoming Changes and Enhancements to the U.S. EPA's AirNow Program. URL: https://www.4cleanair.org/wp-content/uploads/Documents/Chan_and_White_AirNow_Program.pdf.
88. Adler G. Breezometer: Democratize air quality data worldwide. URL: https://atmosphere.copernicus.eu/sites/default/files/2018-11/3_CAMS_BreezoMeter.pdf.
89. Cespedes F. V., Allison M. C., Margot E. BreezoMeter: Making Air Pollution Data Actionable. *Harvard Business School Case*. 2018. P. 819-058.
90. Korber R. BreezoMeter vs. Government Air Quality Data: 5 Things to Know. URL: <https://www.linkedin.com/pulse/breezometer-vs-government-air-quality-data-5-things-know-ran-korber/>.
91. The Use of the Internet of Things for Estimating Personal Pollution Exposure / K. A. G. Arano et al. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2019. Vol. 16, no. 17. P. 3130.
92. Laboratory evaluation of low-cost air quality monitors and single sensors for monitoring typical indoor emission events in Dutch daycare centers / H. Zheng et al. *Environment International*. 2022. Vol. 166. P. 107372.
93. Yaici W., Entchev E., Longo M. Internet of Things (IoT)-Based System for Smart Home Heating and Cooling Control. *2022 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2022 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe)*, Prague, Czech Republic, 28 June – 1 July 2022. 2022.
94. Датчик SHT20. URL: <https://izi.ua/p-29182750-xy-md01-sht20-datchik-temperature-i-vlazhnosti-pod-rs485-modbus-rtu>.
95. Високоточний лазерний датчик якості повітря Nova PM SDS011. URL: <https://diyshop.com.ua/ua/vysokotochnyj-lazernyj-datchik-kachestva-vozduha-nova-pm-sds011>.
96. Дозиметр РАДЕКС РД1503. URL: <https://electronoff.ua/ua/good/dozimetr-radeks-rd1503-plyus.php>.
97. TGS2600: Air Quality Sensor. URL: <https://www.figarosensor.com/product/entry/tgs2600.html>.

98. APDA 372 Horiba Group Europe. URL: <https://envirosys.gr/en/catalog/environmental-systems/air-pollution/particulate-analyzers/apda-372-horiba-group-europe>.

99. The MiCS-VZ-89TE is an integrated sensor board for Indoor Air Quality monitoring. URL: https://sgx.cdistore.com/datasheets/sgx/mics-vz-89te_v1.0.pdf.

ДОДАТОК А
(обов'язковий)

КОПІЇ СТАТТІ У ФАХОВОМУ НАУКОВОМУ ВИДАННІ

1) T. Hovorushchenko, V. Baranovskyi, O. Ivanov, A. Hnatchuk. Subsystem for monitoring atmospheric air quality in the cyber-physical system “Smart city”. Computer systems and information technologies. 2024. №1.

UDC 004.9

T. O. HOVORUSHCHENKO¹, V. V. BARANOVSKYI¹, O. V. IVANOV¹, A. Y. HNATCHUK^{1,2}¹ Khmelnytskyi National University² Prague University of Economics and Business

SUBSYSTEM FOR MONITORING ATMOSPHERIC AIR QUALITY IN THE CYBER-PHYSICAL SYSTEM "SMART CITY"

The task of designing and developing a cyber-physical system "Smart City" is currently relevant for Ukraine. This study is devoted to the development of a method and subsystem for monitoring atmospheric air quality in the cyber-physical system "Smart City".

The article develops a method for monitoring atmospheric air quality, which forms the basis for effective monitoring of atmospheric air quality in the cyber-physical system "Smart City" and allows making informed decisions on warning residents about the danger with recommendations for protecting their health.

The developed subsystem for monitoring atmospheric air quality in the cyber-physical system "Smart City" collects data from the installed sensors of air humidity, air temperature, dust content in the air, including particles PM_{2.5}, PM₁₀, air radiation background, air pollution level by nitrogen oxides, air pollution level by sulfur, air pollution level by carbon compounds, air pollution level by greenhouse gases CO, CO₂, NH₃, NO, real-time transmission of the collected data to the data processing server, real-time processing and analysis of the received data using various analytical methods, visualization of the air quality monitoring results in the form of a city map with n districts displaying all air parameters. The user can select the air parameters of interest in the mobile application of the cyber-physical system. After selecting such parameters, the visualization of the air quality monitoring results is adapted to the user's needs: the measured value of the parameter selected by the user is displayed on the image of the district on the city map, and the mobile application displays a sound signal in the background and a flashing sign on the image of the district on the city map in the application, which signals a danger in this area of the city; clicking on this sign displays a notification on the screen about the indicator for which there is a danger and recommendations for protecting the health of residents in this case.

Keywords: cyber-physical system "Smart City", atmospheric air parameters, air quality monitoring, air humidity sensor, air temperature sensor, air dust content sensor, including particles PM_{2.5}, PM₁₀, air radiation background sensor, sensor for air pollution level by nitrogen oxides, sensor for air pollution level by sulfur, sensor for air pollution level by carbon compounds, sensor for air pollution level by greenhouse gases CO, CO₂, NH₃, NO.

T. O. ГОВОРУЩЕНКО¹, В. В. БАРАНОВСЬКИЙ¹, О. В. ІВАНОВ¹, А. Я. ГНАТЧУК^{1,2}¹ Хмельницький національний університет² Празький університет економіки та бізнесу

ПІДСИСТЕМА МОНІТОРИНГУ ЯКОСТІ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ У КІБЕРФІЗИЧНІЙ СИСТЕМІ «РОЗУМНЕ МІСТО»

Анотація – Задача проектування та розроблення кіберфізичної системи «Розумне місто» є наразі актуальною для України. Дане дослідження присвячене розробленню методу та підсистеми моніторингу якості атмосферного повітря у кіберфізичній системі «Розумне місто».

У статті розроблений метод моніторингу якості атмосферного повітря, який становить основу для ефективного моніторингу якості атмосферного повітря у кіберфізичній системі "Розумне місто" і дозволяє приймати обґрунтовані рішення щодо сповіщення мешканців про небезпеку із наданням рекомендацій щодо захисту їх здоров'я.

Розроблена підсистема моніторингу якості атмосферного повітря у кіберфізичній системі "Розумне місто" виконує збір даних з встановлених датчиків вологості повітря, температури повітря, вмісту пилу у повітрі, в т.ч. частинками PM_{2.5}, PM₁₀, радіаційного фону повітря, рівня забруднення повітря оксидами азоту, рівня забруднення повітря сіркою, рівня забруднення повітря вуглецевими сполуками, рівня забруднення повітря парниковими газами CO, CO₂, NH₃, NO, передачу зібраних даних в реальному часі до сервера обробки даних, обробку та аналіз отриманих даних в реальному часі з використанням різних аналітичних методів, візуалізацію результатів моніторингу якості повітря у вигляді карти міста з n районів із відображенням всіх параметрів повітря. Користувач в мобільному додатку кіберфізичної системи може виконати вибір параметрів повітря, які його цікавлять. Після вибору таких параметрів відбувається адаптація візуалізації результатів моніторингу якості повітря під потреби користувача – відбувається виведення виміряного значення обраного користувачем параметру на зображенні району на карті міста, а також відбувається виведення звукового сигналу мобільним додатком у фоновому режимі та миготливого знаку на зображенні району на карті міста в додатку, який сигналізує про небезпеку в даному районі міста; натискання на цей знак виводить на екран сповіщення про те, за яким показником існує небезпека та рекомендації щодо захисту здоров'я мешканців в такому випадку.

Ключові слова: кіберфізична система «Розумне місто», параметри атмосферного повітря, моніторинг якості повітря, датчик вологості повітря, датчик температури повітря, датчик вмісту пилу у повітрі, в т.ч. частинками PM_{2.5}, PM₁₀, датчик радіаційного фону повітря, датчик рівня забруднення повітря оксидами азоту, датчик рівня забруднення повітря сіркою, датчик рівня забруднення повітря вуглецевими сполуками, датчик рівня забруднення повітря парниковими газами CO, CO₂, NH₃, NO.

Introduction

The "Smart City" is a concept of urban development that involves the use of innovative technologies and the integration of digital solutions to improve the quality of life of residents and the efficient management of urban infrastructure. The main goal of a smart city is to create a viable, environmentally friendly, efficient, and innovative environment for people to live in [1-3]. Smart cities and the Internet of Things have made it possible to integrate communication devices for effective decision-making [2]. Given that, according to the UN, more than 72% of the world's population is expected to live in cities by 2050, effective decision-making and efficient organization of city residents

using the concept of "Smart City", a new approach to urban planning that uses data and technology to improve the quality of life of residents while reducing the impact of urbanization on the environment, is more relevant than ever [3].

The main characteristics of "Smart City" [3-5] are:

- 1) integrated communication network and the Internet of Things – the installation of sensors and other devices that collect data on various aspects of urban life, such as transportation, energy, water, waste, security, etc;
- 2) digital technologies and data analytics – the use of data analysis to make informed management decisions and optimize various processes in the city;
- 3) efficient resource management – the use of technology to optimize the use of energy, water, transportation and other resources to reduce consumption and improve efficiency;
- 4) infrastructure for mobility – development of infrastructure to encourage environmentally friendly modes of transportation, such as bicycles, electric vehicles, and public transport, in order to reduce congestion and air pollution;
- 5) active community participation – involvement of city residents in the decision-making process using digital platforms and feedback mechanisms;
- 6) security and data protection – ensuring the protection of personal data and cybersecurity in the context of widespread use of digital technologies.

The implementation of the smart city concept contributes to the creation of cities that are more viable, competitive, environmentally friendly and comfortable to live in.

The cyber-physical system "Smart City" is an innovative integrated platform that combines data collection and analysis technologies, communication systems, and information technologies to improve the quality of life of city residents, optimize the management of urban infrastructure, and increase the efficiency of various areas of city life. Such a system allows collecting large amounts of data from various sources, analyzing them in real time, and making decisions based on this information [6-8]. Smart cities are seen as catalysts for transforming the socio-economic environment of a city into a more knowledge-intensive and environmentally friendly one [7].

The main components of the cyber-physical system "Smart City" are [9, 10]:

- 1) sensors – installation of sensors throughout the city to collect data on various parameters such as air pollution, traffic, noise, humidity, temperature, etc.;
- 2) communication network – deployment of communication networks (e.g., wireless, mobile networks, Internet of Things, etc.) to enable real-time data transmission between sensors and a centralized data processing system;
- 3) data processing and analysis – development of algorithms and software for processing and analyzing large amounts of data received from sensors and other sources in order to identify patterns, trends and forecast events;
- 4) integrated management system – the creation of a centralized management system includes an interface for city administrators, dispatch centers, control panels and data visualization tools;
- 5) infrastructure automation and management systems – the use of data to automate the management of various city systems, such as lighting, water supply, transportation, waste, security, etc. to optimize their operation and efficiency;
- 6) community feedback and interaction systems – providing opportunities for feedback and interaction with city residents through mobile applications, web platforms, and other tools to report problems, feedback, and suggestions for improving services and infrastructure.

The cyber-physical system "Smart City" has great potential to improve the management of urban resources, reduce negative environmental impacts, and improve the quality of life of city residents.

The cyber-physical systems "Smart City" are constantly evolving, integrating new technologies that allow cities to become even more efficient and environmentally friendly, such as the use of artificial intelligence for data analysis, the development of autonomous vehicles, the introduction of smart energy supply systems, and much more [11-13]. The cyber-physical systems "Smart City" can include intelligent analytical tools that allow cities to collect, process, and analyze large amounts of data to make more informed management decisions, such as analyzing traffic flows to optimize traffic, forecasting demand for utilities, identifying congestion and taking measures to eliminate it, and analyzing air quality to identify sources of pollution and take measures to reduce it [14-16]. Such cyber-physical systems are a key tool for achieving modern urban development goals and improving the quality of life of their residents. They make cities more efficient, safe, environmentally friendly, and comfortable to live in.

Air pollution is a serious environmental problem in our daily lives. Deteriorating air quality has a negative impact on public health and the environment. Environmental pollution and air quality are becoming increasingly important topics in the areas of Smart City and government regulation. Air quality monitoring in a cyber-physical system "Smart City" plays a key role in ensuring the health and comfort of residents, as well as in preserving the environment. A real-time air quality monitoring subsystem helps to track sudden changes in the atmosphere [17-19]. Solving pollution problems is one of the main challenges faced by cities today, since cities are the main sources of pollutant emissions and, on the other hand, are areas where the impact of pollution on human health (especially on the respiratory tract, cardiovascular system, and nervous system) is quite significant. Therefore, monitoring of air quality in cities is crucial, as it is a preliminary and

necessary step for the development and further implementation of measures aimed at reducing pollution in order to preserve the health of citizens [20].

Air quality monitoring in the cyber-physical system "Smart City" is performed by placing sensors throughout the city to measure various air quality parameters, such as humidity, temperature, dust content, including particles PM_{2.5}, PM₁₀, radiation background, pollution levels with nitrogen oxides, sulfur, carbon compounds, greenhouse gases such as CO, CO₂, NH₃, NO etc. and other harmful substances. The data from the sensors are analyzed and processed, as a result of which alerts can be sent to city residents in case of severe air pollution and advice on how to protect their health [20-22]. Air quality monitoring in the cyber-physical system "Smart City" is an important tool for ensuring the safety and comfort of residents, improving the quality of life and preserving the environment [23-25].

Online collaborative platforms for sensor data management are services with online databases that allow sensor owners to register and connect their devices to submit data to the database online for storage, and allow developers to connect to the database and create their own applications based on this data [26].

The European Union is making ongoing efforts to develop a strategy for achieving smart urban growth for the largest cities and regions [27]. The EU has developed a number of programs as part of the "Europe Agenda" [28]. "Arup" estimates that the global market for smart city services was worth \$400 billion per year in 2020 [29]. Examples of smart city technology have been implemented in Milton Keynes [30], Southampton [31], Amsterdam [32], Barcelona [33], and Stockholm [34]. An important cluster of smart city tech companies exists in Israel, where Tel Aviv was awarded the 2014 World Smart City Award [35].

Let's consider the known examples of the implementation of the smart city concept, which demonstrate the variety of approaches and innovative solutions used by cities to improve the quality of life and create a sustainable, efficient and comfortable urban infrastructure [5].

Launched in 2009, Amsterdam's Smart City initiative currently includes more than 170 projects jointly developed by local residents, government, and business. These projects are developed on the basis of wireless devices that serve to increase the city's ability to make real-time decisions. The projects aim to reduce traffic, save energy, and improve public safety. To stimulate the efforts of local residents, the city holds an annual Smart City competition, accepting proposals for improvements that fit into the city's structure. An example of an app developed by city residents is Mobypark, which allows owners of parking spaces to rent them out to people for a fee. The data obtained from this application can then be used by the city to determine parking demand and traffic flows in Amsterdam. In addition, smart energy meters have been installed in a number of buildings, and incentives are provided for those who actively reduce energy consumption. Other initiatives include flexible street lighting, which allows municipalities to control the brightness of streetlights, and intelligent traffic management, where traffic is monitored in real time and information about the current traffic on certain roads is broadcast to allow motorists to determine the best routes [32].

According to the Smart Cities study conducted by Juniper Research in 2015, Barcelona ranks first in the world in the ranking of "smart cities". Every year, Barcelona hosts the international conference Smart City Expo World Congress, where the authorities of the largest cities and technology companies present their solutions in the field of smart city development. Barcelona is implementing smart solutions to optimize its transportation system, water, energy and waste management. The city is also developing smart applications and platforms to interact with residents and ensure their participation in city management [33].

Copenhagen is considered one of the smartest cities in Europe. It is actively implementing innovative technologies to improve the transportation system, use renewable energy sources, and promote green initiatives [36].

The English city Milton Keynes has made an attempt to turn itself into a "smart city". Currently, the mechanism for achieving this goal is the "MK: The Smart Initiative" [30, 37], a collaboration of local authorities, businesses, academia, and organizations. The focus of this initiative is to rationalize the use of energy, water, and transportation while promoting economic growth in the city. Central to this project is the idea of creating an advanced "MC Data Hub" that would support the collection and management of a huge amount of information relevant to the city system from various sources. This includes information on electricity consumption and water consumption, traffic flows, satellite data, social and economic data, and crowdsourcing received through social media or specialized applications.

Singapore is considered one of the most advanced smart cities in the world. The city is implementing technologies to manage its transportation system, water supply, energy, and waste. It also actively uses digital solutions to ensure security and monitor the health of residents [38].

Toronto is launching the Sidewalk Toronto project, together with Sidewalk Labs, to create a smart district on the city's coastal territory. This project involves the use of innovative technologies to optimize transport infrastructure, energy, construction, and housing [39].

Kyiv has also launched the Kyiv Smart City initiative, which aims to create favorable conditions for the city's evolution. The concept lays down the basic principles of the city's infrastructure, technological, and social development, and identifies areas for transforming urban space [40]. To date, Kyiv has implemented the Kyiv Card project, which is the "access key" for city residents to innovations implemented in the city.

The city Santander in Cantabria, northern Spain, has 20000 sensors connecting buildings, infrastructure, transportation, and communication networks, offering a physical space for experimentation and testing IoT functions such

as interoperability and management of protocols, technological devices, and ancillary services such as detection, identity management, and security [41]. In Santander, sensors monitor pollution, noise, traffic, and parking.

Sydney is actively implementing a smart city in many areas, such as transportation, energy, healthcare, and culture. The city uses information technology to optimize public transport, introduce smart traffic lights, energy-efficient lighting, and air pollution monitoring systems [42].

These examples demonstrate that the smart city concept is widely used around the world and has significant potential for creating sustainable, efficient, and comfortable urban environments. Currently, this concept is not widely used for the development of Ukrainian cities, mainly due to its high cost, although it has a huge potential for them, especially during post-war reconstruction.




So, the task of designing and developing a cyber-physical system "Smart City" is currently relevant for Ukraine. This study is devoted to the development of a method and subsystem for monitoring atmospheric air quality in the cyber-physical system "Smart City".

Subsystem for Monitoring Atmospheric Air Quality in the Cyber-Physical System "Smart City"


Before proceeding to the development of a method for monitoring atmospheric air quality and the design of the subsystem for monitoring atmospheric air quality in the cyber-physical system "Smart City", we will define the purpose and objects of air quality monitoring among following purposes: measuring various air parameters and current air quality monitoring, identifying pollution sources and their location in different parts of the city, identifying the impact of air pollution on the health of city/district residents, identifying trends in air quality, and further. For this study, the specific goal will be to measure various air parameters and ongoing air quality monitoring.

The method of air quality monitoring consists of the following steps:


- 1) setting a set of normal values of air parameters: air dust content ($adcth$), PM2.5 content ($apmmth$), PM10 content ($apmth$), air radiation background ($arbth$), air pollution level by nitrogen oxides ($anoth$), air pollution level by sulfur ($asth$), air pollution level by carbon compounds ($accth$), air pollution level by greenhouse gases CO ($acoth$), CO₂ ($acooth$), NH₃ ($anhth$), NO ($anaoth$): $APTH = \{apth_1, apth_2, \dots, apth_n\} = \{adcth, arbth, anoth, asth, accth, acoth, acooth, anhth, anaoth, apmmth, apmth\}$, when exceeded, the city residents are notified of the danger and recommendations are given to protect their health;
- 2) selection and placement of sensors - selection of appropriate sensors for measuring key air quality parameters, such as air humidity, air temperature, dust content in the air, including particles PM2.5, PM10, air radiation background, air pollution level by nitrogen oxides, air pollution level by sulfur, air pollution level by carbon compounds, air pollution level by greenhouse gases CO, CO₂, NH₃, NO, as well as the systematic placement of sensors in different areas of the city to ensure representativeness and coverage of the entire city; if there is a need to measure air parameters in hard-to-reach places, drones or robots can be equipped with appropriate sensors;
- 3) collecting data from installed sensors connected to the Internet of Things network:
 - 3.1) forming a set of air humidity values $AH = \{ah_1, ah_2, \dots, ah_n\}$ based on data obtained from n air humidity sensors located in n city districts;
 - 3.2) forming a set of air temperature values $AT = \{at_1, at_2, \dots, at_n\}$ based on data obtained from n air temperature sensors located in n city districts;
 - 3.3) forming a set of values of dust content in the air $ADC = \{adc_1, adc_2, \dots, adc_n\}$ based on data obtained from n dust content sensors located in n city districts;
 - 3.4) forming a set of values of the level of the content of PM2.5 particles in the air $APMM = \{apmm_1, apmm_2, \dots, apmm_n\}$ based on data obtained from n sensors of content of PM2.5 particles in the air located in n districts of the city;
 - 3.5) forming a set of values of the level of the content of PM10 particles in the air $APMT = \{apmt_1, apmt_2, \dots, apmt_n\}$ based on data obtained from n sensors of content of PM10 particles in the air located in n districts of the city;
 - 3.6) forming a set of values of air radiation background $ARB = \{arb_1, arb_2, \dots, arb_n\}$ based on data obtained from n air radiation background sensors located in n city districts;
 - 3.7) forming a set of values of the level of air pollution by nitrogen oxides $ANO = \{ano_1, ano_2, \dots, ano_n\}$ based on data obtained from n sensors of air pollution by nitrogen oxides located in n city districts;
 - 3.8) forming a set of values of the level of air pollution by sulfur $AS = \{as_1, as_2, \dots, as_n\}$ based on data obtained from n sulfur air pollution sensors located in n city districts;
 - 3.9) forming a set of values of the level of air pollution by carbon compounds $ACC = \{acc_1, acc_2, \dots, acc_n\}$ based on data obtained from n sensors of air pollution by carbon compounds located in n city districts;
 - 3.10) forming a set of values of the level of air pollution greenhouse gas CO $ACO = \{aco_1, aco_2, \dots, aco_n\}$ based on data obtained from n sensors of air pollution greenhouse gas CO located in n districts of the city;

- 3.11) forming a set of values of the level of air pollution greenhouse gas CO₂ $ACOO = \{acoo_1, acoo_2, \dots, acoo_n\}$ based on data obtained from n sensors of air pollution greenhouse gas CO₂ located in n districts of the city;
- 3.12) forming a set of values of the level of air pollution of greenhouse gas NH₃ $ANH = \{anh_1, anh_2, \dots, anh_n\}$ based on data obtained from n sensors of air pollution of greenhouse gas NH₃ located in n districts of the city;
- 3.13) forming a set of values of the level of air pollution of greenhouse gas NO $ANAO = \{anao_1, anao_2, \dots, anao_n\}$ based on data obtained from n greenhouse gas NO air pollution sensors located in n city districts;
- 4) transfer of the collected data in real time using the Internet of Things network to the data processing server;
- 5) processing and analysis of the obtained data in real time using various analytical methods – either for the purpose of current monitoring of air quality, or to identify sources of air pollution and their location in different parts of the city, or to identify the impact of air pollution on the health of city residents / city district, or to identify trends and further forecast air quality, etc.; for this study, given the chosen goal of air quality monitoring, the processing and analysis of the data obtained will be carried out exclusively for the purpose of ongoing air quality monitoring;
- 6) visualization of the results of air quality monitoring – in the form of a map of the city with n districts with a graphical display of all air parameters using color schemes or symbols indicating the intensity of air pollution, in the form of graphs and/or diagrams for easy perception and analysis by city authorities, researchers and city residents;
- 7) selection of air parameters by the user – selection of air parameters of interest to the user (the user can select from 1 to 11 of the above parameters);
- 8) adaptation of the visualization of air quality monitoring results to the user's needs – in the form of a city map of n districts with a graphical display of the air parameters of interest to the user using color schemes or symbols indicating the intensity of air pollution, in the form of graphs and/or diagrams for easy perception and analysis by city authorities, researchers and city residents:
 - 8.1) if in step 7 the user selected the "air humidity" parameter, the user is provided with a city map of n districts, each of which shows the corresponding air humidity value of the given district from the set of air humidity values $AH = \{ah_1, ah_2, \dots, ah_n\}$;
 - 8.2) if in step 7 the user selected the "air temperature" parameter, the user is provided with a city map of n districts, each of which shows the corresponding air temperature value of the given district from the set of air temperature values $AT = \{at_1, at_2, \dots, at_n\}$;
 - 8.3) if in step 7 the user selected the "dust content in the air" parameter, the user is generated a city map of n districts, each of which shows the corresponding value of dust content in the air of the given district from the set of values of dust content in the air $ADC = \{adc_1, adc_2, \dots, adc_n\}$; if in the i -th district of the city $adc_i \geq adcth$, the mobile application running in the background emits a sound signal, and a flashing sign  appears on the image of the district on the city map in the application, signaling the danger in this area of the city; clicking on this sign displays a notification screen: "The dust content in the air exceeds the norm" and recommendations for protecting the health of residents in this case;
 - 8.4) if in step 7 the user selected the parameter "level of content of PM_{2.5} particles in the air", the user is shown a map of the city with n districts, each of which shows the corresponding value of the level of content of PM_{2.5} particles in the air of the given district from the set of values of the level of content of PM_{2.5} particles in the air $APMM = \{apmm_1, apmm_2, \dots, apmm_n\}$; if in the i -th district of the city $apmm_i \geq apmmth$, the mobile application running in the background emits a sound signal, and a flashing sign  appears on the image of the district on the city map in the application, signaling the danger in this area of the city; clicking on this sign displays a notification screen: "The level of content of PM_{2.5} particles in the air exceeds the norm" and recommendations for protecting the health of residents in this case;
 - 8.5) if in step 7 the user has selected the parameter "level of content of PM₁₀ particles in the air", the user is shown a map of the city with n districts, each of which shows the corresponding value of the level of content of PM₁₀ particles in the air of the given district from the set of values of the level of content of PM₁₀ particles in the air $APMT = \{apmt_1, apmt_2, \dots, apmt_n\}$; if in the i -th district of the city $apmt_i \geq apmth$, the mobile application running in the background emits a sound signal, and a flashing sign  appears on the image of the district on the city map in the application, signaling the danger in this area of the city; clicking on this sign displays a notification screen: "The level of content of PM₁₀ particles in the air exceeds the norm" and recommendations for protecting the health of residents in this case;


- 8.6) if in step 7 the user selected the "air radiation background" parameter, the user is shown a map of the city with n districts, each of which shows the corresponding value of the air radiation background of the given district from the set of air radiation background values $ARB = \{arb_1, arb_2, \dots, arb_n\}$; if in the i -th district of the city $arb_i \geq arb_{th}$, the mobile application running in the background emits a sound

signal, and a flashing sign  appears on the image of the district on the city map in the application, signaling the danger in this area of the city; clicking on this sign displays a notification screen: "The radiation background of the air exceeds the norm" and recommendations for protecting the health of residents in this case;


- 8.7) if in step 7 the user selected the parameter "level of air pollution by nitrogen oxides", the user is shown a map of the city with n districts, each of which shows the corresponding value of the level of air pollution by nitrogen oxides of the given district from the set of values of the level of air pollution by nitrogen oxides $ANO = \{ano_1, ano_2, \dots, ano_n\}$; if in the i -th district of the city $ano_i \geq ano_{th}$, the mobile

application running in the background emits a sound signal, and a flashing sign  appears on the image of the district on the city map in the application, signaling the danger in this area of the city; clicking on this sign displays a notification screen: "The level of air pollution with nitrogen oxides exceeds the norm" and recommendations for protecting the health of residents in this case;


- 8.8) if in step 7 the user selected the "sulfur air pollution level" parameter, the user is shown a city map of n districts, each of which shows the corresponding value of the sulfur air pollution level of the given district from the set of values of the sulfur air pollution level $AS = \{as_1, as_2, \dots, as_n\}$; if in the i -th district of the city $as_i \geq as_{th}$, the mobile application running in the background emits a sound signal,

and a flashing sign  appears on the image of the district on the city map in the application, signaling the danger in this area of the city; clicking on this sign displays a notification screen: "The level of sulfur air pollution exceeds the norm" and recommendations for protecting the health of residents in this case;


- 8.9) if in step 7 the user has selected the parameter "level of air pollution by carbon compounds", the user is shown a map of the city with n districts, each of which shows the corresponding value of the level of air pollution by carbon compounds of the given district from the set of values of the level of air pollution by carbon compounds $ACC = \{acc_1, acc_2, \dots, acc_n\}$; if in the i -th district of the city $acc_i \geq acc_{th}$, the mobile application running in the background emits a sound signal, and a flashing sign

 appears on the image of the district on the city map in the application, signaling the danger in this area of the city; clicking on this sign displays a notification screen: "The level of air pollution with carbon compounds exceeds the norm" and recommendations for protecting the health of residents in this case;

- 8.10) if in step 7 the user has selected the parameter "level of air pollution by greenhouse gas CO", the user is shown a map of the city with n districts, each of which shows the corresponding value of the level of air pollution by greenhouse gas CO of the given district from the set of values of the level of air pollution by greenhouse gas CO $ACO = \{aco_1, aco_2, \dots, aco_n\}$; if in the i -th district of the city $aco_i \geq aco_{th}$, the mobile application running in the background emits a sound signal, and a flashing sign

 appears on the image of the district on the city map in the application, signaling the danger in this area of the city; clicking on this sign displays a notification screen: "The level of air pollution with greenhouse gas CO exceeds the norm" and recommendations for protecting the health of residents in this case;

- 8.11) if in step 7 the user has selected the parameter "level of air pollution of greenhouse gas CO₂", the user is shown a map of the city with n districts, each of which shows the corresponding value of the level of air pollution of greenhouse gas CO₂ of the given district from the set of values of the level of air pollution of greenhouse gas CO₂ $ACOO = \{acoo_1, acoo_2, \dots, acoo_n\}$; if in the i -th district of the city $acoo_i \geq acoo_{th}$, the mobile application running in the background emits a sound signal, and a

flashing sign  appears on the image of the district on the city map in the application, signaling the danger in this area of the city; clicking on this sign displays a notification screen: "The level of air pollution with greenhouse gas CO₂ exceeds the norm" and recommendations for protecting the health of residents in this case;


- 8.12) if in step 7 the user has selected the parameter "level of air pollution of greenhouse gas NH₃", the user is generated a city map of n districts, each of which shows the corresponding value of the level

of air pollution of greenhouse gas NH₃ of the given district from the set of values of the level of air pollution of greenhouse gas NH₃ $ANH = \{anh_1, anh_2, \dots, anh_n\}$; if in the i -th district of the city $anh_i \geq anhh$, the mobile application running in the background emits a sound signal, and a flashing sign



appears on the image of the district on the city map in the application, signaling the danger in this area of the city; clicking on this sign displays a notification screen: "The level of air pollution with greenhouse gas NH₃ exceeds the norm" and recommendations for protecting the health of residents in this case;


- 8.13) if in step 7 the user has selected the parameter "level of air pollution greenhouse gas NO", the user is shown a map of the city with n districts, each of which shows the corresponding value of the level of air pollution greenhouse gas NO of the given district from the set of values of the level of air pollution greenhouse gas NO $ANA0 = \{anao_1, anao_2, \dots, anao_n\}$; if in the i -th district of the city $anao_i \geq anaoth$,

the mobile application running in the background emits a sound signal, and a flashing sign  appears on the image of the district on the city map in the application, signaling the danger in this area of the city; clicking on this sign displays a notification screen: "The level of greenhouse gas NO air pollution exceeds the norm" and recommendations for protecting the health of residents in this case.

The developed method for monitoring atmospheric air quality forms the basis for effective monitoring of atmospheric air quality in the cyber-physical system "Smart City" and allows making informed decisions on warning residents about the danger with recommendations for protecting their health. The use of this monitoring method allows cities to obtain accurate and up-to-date information on air quality, which is an important step in making strategic decisions to reduce pollution and improve environmental quality. Moreover, the data provided by the method can be used to develop and implement effective programs and projects in urban planning, transport infrastructure, energy efficiency, and other aspects of urban life.

Let's design the architecture of the subsystem for monitoring atmospheric air quality in the cyber-physical system "Smart City" based on the developed method – Fig. 1.

So, the developed subsystem for monitoring atmospheric air quality in the cyber-physical system "Smart City" collects data from the installed sensors of air humidity, air temperature, dust content in the air, including particles PM_{2.5}, PM₁₀, air radiation background, air pollution level by nitrogen oxides, air pollution level by sulfur, air pollution level by carbon compounds, air pollution level by greenhouse gases CO, CO₂, NH₃, NO, real-time transmission of the collected data to the data processing server, real-time processing and analysis of the received data using various analytical methods, visualization of the air quality monitoring results in the form of a city map with n districts displaying all air parameters. The user can select the air parameters of interest in the mobile application of the cyber-physical system. After selecting such parameters, the visualization of the air quality monitoring results is adapted to the user's needs: the measured value of the parameter selected by the user is displayed on the image of the district on the city map, and the mobile application

displays a sound signal in the background and a flashing sign  on the image of the district on the city map in the application, which signals a danger in this area of the city; clicking on this sign displays a notification on the screen about the indicator for which there is a danger and recommendations for protecting the health of residents in this case.

Thus, the subsystem for monitoring atmospheric air quality in the cyber-physical system "Smart City" plays an important role in ensuring the health and comfort of residents, as well as in preserving the environment. The main goal of this subsystem is to collect, analyze, and visualize air quality data in the city to make informed management decisions and take measures to reduce pollution and improve air quality. It is also important to ensure that this data is accessible and open to a wide range of stakeholders, including city authorities, researchers, NGOs, and city residents. This will help to raise awareness of air pollution problems and facilitate joint efforts to address them. This approach to monitoring air quality in the cyber-physical system "Smart City" allows to create an effective toolkit for sustainable development and ensuring the health and comfort of residents.

The developed subsystem for monitoring atmospheric air quality in the cyber-physical system "Smart City" can be developed by identifying sources of pollution and their location in different parts of the city, identifying the impact of air pollution on the health of city / city district residents, identifying trends in air quality and further forecasting air quality in order to develop a strategy for improving air quality, etc. Continuous improvement of the monitoring subsystem is necessary to ensure maximum accuracy and efficiency of air quality monitoring. In addition, it is highly desirable to integrate air quality data with other Smart City systems, such as transport management systems, energy systems, water management systems, etc. for a comprehensive approach to addressing environmental pollution and creating an environmentally friendly living environment, as well as to ensure effective management of the urban environment and take measures to improve it.

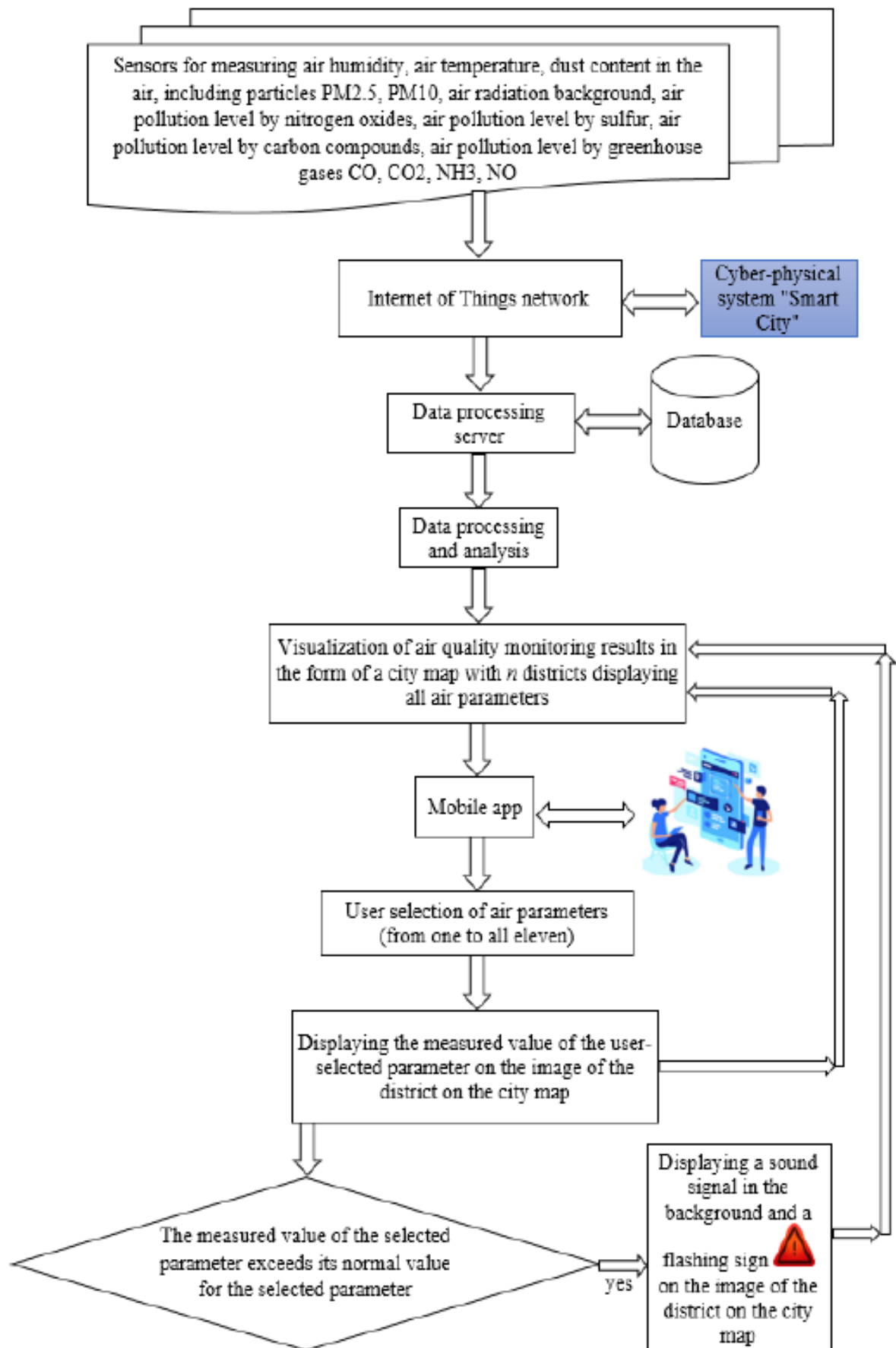


Fig. 1. Architecture of the subsystem for monitoring atmospheric air quality in the cyber-physical system "Smart City"

Conclusions

The developed subsystem for monitoring atmospheric air quality in the cyber-physical system "Smart City" collects data from the installed sensors of air humidity, air temperature, dust content in the air, including particles PM2.5, PM10, air radiation background, air pollution level by nitrogen oxides, air pollution level by sulfur, air pollution level by carbon compounds, air pollution level by greenhouse gases CO, CO₂, NH₃, NO, real-time transmission of the collected data to the data processing server, real-time processing and analysis of the received data using various analytical methods, visualization of the air quality monitoring results in the form of a city map with n districts displaying all air parameters. The user can select the air parameters of interest in the mobile application of the cyber-physical system. After selecting such parameters, the visualization of the air quality monitoring results is adapted to the user's needs: the measured value of the parameter selected by the user is displayed on the image of the district on the city map, and the mobile application displays a sound signal in the background and a flashing sign on the image of the district on the city map in the application, which signals a danger in this area of the city; clicking on this sign displays a notification on the screen about the indicator for which there is a danger and recommendations for protecting the health of residents in this case.

References

1. A new framework for assessment of park management in smart cities: a study based on social media data and deep learning / S. Liu et al. *Scientific Reports*. 2024. Vol. 14, no. 1.
2. A vehicular network based intelligent transport system for smart cities using machine learning algorithms / J. Prakash et al. *Scientific Reports*. 2024. Vol. 14, no. 1.
3. CSR and smart city progress: a proposed model for urban development / K. Singh et al. *Letters in Spatial and Resource Sciences*. 2023. Vol. 17, no. 1.
4. Hovorushchenko T. O., Aleksov S. V., Talapchuk S. I., Shpylyuk O. V., Magdin V. V. Overview of the Methods and Tools for Situation Identification and Decision-Making Support in the Cyberphysical System "Smart House". *Computer Systems & Information Technologies*. 2022. №4. Pp. 20-26.
5. Sustainable open data ecosystems in smart cities: A platform theory-based analysis of 19 European cities / M. Lnenicka et al. *Cities*. 2024. Vol. 148. P. 104851.
6. Ji C., Niu Y. A hybrid evolutionary and machine learning approach for smart city planning: Digital twin approach. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. 2024. Vol. 64. P. 103650.
7. Kim J. S., Feng Y. Understanding complex viewpoints in smart sustainable cities: The experience of Suzhou, China. *Cities*. 2024. Vol. 147. P. 104832.
8. Chen C., Li S.-E., Wang L. Can smart cities reduce labor misallocation? Evidence from China. *Technological Forecasting and Social Change*. 2024. Vol. 201. P. 123264.
9. Experts and intelligent systems for smart homes' Transformation to Sustainable Smart Cities: A comprehensive review / N. U. Huda et al. *Expert Systems with Applications*. 2024. Vol. 238. P. 122380.
10. Zheng X., Li M., Guo J. Task scheduling using edge computing system in smart city. *International Journal of Communication Systems*. 2020. P. e4422.
11. Shiu S. C.-o. Ageing in a smart city poses concerns on sustainability from a model perspective. *Aging and Health Research*. 2024. P. 100179.
12. Concept of Intelligent Measuring System for Analyzing the Energy Consumption of IoT Modules / A. Sachenko et al. *Computer systems and information technologies*. 2022. No. 4. P. 101–105.
13. Active smart switchable glazing for smart city: A review / A. Ghosh et al. *Journal of Building Engineering*. 2024. P. 108644.
14. Pavlova O., Kovalenko V., Hovorushchenko T., Avsiyevych V. Neural network based image recognition method for smart parking. *Computer Systems and Information Technologies*. 2021. №1. Pp. 49-55.
15. Kesar P., Ache (Peter) P. M. Past, present and future of the Smart City in India: An institutional perspective. *Cities*. 2024. Vol. 146. P. 104775.
16. Smart cities and sustainable development goals (SDGs): A systematic literature review of co-benefits and trade-offs / A. Sharifi et al. *Cities*. 2024. Vol. 146. P. 104659.
17. Air Quality Hotspot Monitoring with Trajectories of IoT in Smart City Implementation / S. C. Bhangale et al. 2023 3rd International Conference on Pervasive Computing and Social Networking (ICPCSN), Salem, India, 19–20 June 2023. 2023.
18. Holubčík M., Jandačka J., Nicolanská M. Improvement of Emission Monitoring System Accuracy in Aims of Increasing Air Quality of Smart City. *Mobile Networks and Applications*. 2023.
19. Das S., Alzimami A. Bayesian Optimization based Hyperparameter Tuning of Ensemble Regression Models in Smart City Air Quality Monitoring Data Analytics. 2023 1st International Conference on Advanced Innovations in Smart Cities (ICAISC), Jeddah, Saudi Arabia, 23–25 January 2023. 2023.
20. Designing Air Quality Monitoring Systems in Smart Cities / A. Marini et al. *Communications in Computer and Information Science*. Cham, 2022. P. 3–20.
21. Verma H., Prabhu S. Implementation Of IoT and Applications in Smart City in Achieving the Smart Environment. 2023 Second International Conference on Augmented Intelligence and Sustainable Systems, Trichy, India, 23–25 August 2023.

22. Smart and Portable Air-Quality Monitoring IoT Low-Cost Devices in Ibarra City, Ecuador / V. E. Alvear-Puertas et al. *Sensors*. 2022. Vol. 22, no. 18. P. 7015.
23. Tancev G., Toro F. G. Towards a Digital Twin for Air Quality Monitoring Networks in Smart Cities. 2022 IEEE International Smart Cities Conference (ISC2), Pafos, Cyprus, 26–29 September 2022. 2022.
24. Performance Analysis of LoRaWAN in an Air Quality Monitoring Applications for Smart Cities / A. F. da S. Veloso et al. 2021 6th International Conference on Smart and Sustainable Technologies (SpliTech), Bol and Split, Croatia, 8–11 September 2021. 2021.
25. Jiang X. Large Scale Air-Quality Monitoring in Smart and Sustainable Cities. *Smart Cities*. Hoboken, NJ, USA, 2017. P. 725–753.
26. Boyle D. E., Yates D. C., Yeatman E. M. *Urban Sensor Data Streams: London 2013*. IEEE Internet Computing. 2013. Vol. 17, no. 6. P. 12–20.
27. Paskaleva K. A. Enabling the smart city: the progress of city e-governance in Europe. *International Journal of Innovation and Regional Development*. 2019. Vol. 1, no. 4. P. 405.
28. Shaping Europe's digital future: Commission presents new initiatives for digital infrastructures of tomorrow. URL: <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en>.
29. Smart cities: Digital technologies make smart cities more liveable, sustainable and prosperous. URL: <https://www.arup.com/services/planning/smart-cities>.
30. MK Data Hub. URL: <https://datahub.mksmart.org/>.
31. SmartCities card. URL: <https://www.southampton.gov.uk/roads-parking/travel/smartcities-card/>.
32. City of Amsterdam: Digitalization & Innovation. URL: <https://amsterdamsmartcity.com/organisations/digitalization-innovation>.
33. Barcelona Digital City. URL: <https://ajuntament.barcelona.cat/digital/en>.
34. Stockholm Smart City. URL: <https://nscn.eu/Stockholm>.
35. How Tel Aviv Became One of the World's Smartest Cities. URL: <https://www.iotworldtoday.com/smart-cities/how-tel-aviv-became-one-of-the-world-s-smartest-cities>.
36. Puttkamer L. City Portrait: Smart City Copenhagen. URL: <https://www.beesmart.city/en/smart-city-blog/copenhagen>.
37. Help make Milton Keynes a smarter, greener city. URL: <https://ourmk.org/>.
38. Singapore: the world's smartest city. URL: <https://www.thalesgroup.com/en/worldwide-digital-identity-and-security/iot/magazine/singapore-worlds-smartest-city>.
39. Toronto's Smart City: Our Fight For Privacy. URL: <https://ccla.org/major-cases-and-reports/torontos-smart-city/>.
40. Kyiv Smart City. URL: <https://smartcitykviv.com/>.
41. Smart city case study: Santander, Spain. URL: <https://www.rcrwireless.com/20170116/fundamentals/smart-city-case-study-santander-tag23-tag99>.
42. Sydney a smart city? URL: <https://www.arup.com/perspectives/sydney-a-smart-city>

| | | |
|---|--|--|
| Тетяна Новоружченко Тетяна Говорущенко | DrSc (Engineering), Professor, Head of Computer Engineering & Information Systems Department, Khmelnytskyi National University ORCID: 0000-0002-7942-1857 E-mail: govorushchenko@gmail.com | Доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри комп'ютерної інженерії та інформаційних систем, Хмельницький національний університет |
| Vladyslav Baranovskyi Владислав Барановський | Master Student of Computer Engineering & Information Systems Department, Khmelnytskyi National University E-mail: vybar@i.ua | Магістрант кафедри комп'ютерної інженерії та інформаційних систем, Хмельницький національний університет |
| Oleksii Ivanov Олексій Іванов | PhD, Associate Professor, Associate Professor of Computer Engineering & Information Systems Department, Khmelnytskyi National University ORCID: [0000-0001-6119-4134 E-mail: ivanovov@ukrtelecom.ua | Кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерної інженерії та інформаційних систем, Хмельницький національний університет |
| Alina Hnatchuk Аліна Гнатчук | Master Student of Computer Engineering & Information Systems Department, Khmelnytskyi National University; Master Student of Prague University of Economics and Business ORCID: 0000-0003-0155-9255 E-mail: alinahnatchuk@ukr.net | Магістрантка кафедри комп'ютерної інженерії та інформаційних систем, Хмельницький національний університет; магістрантка Празького університету економіки та бізнесу |

ДОДАТОК Б
(обов'язковий)

ПРЕЗЕНТАЦІЯ ДО ЗАХИСТУ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

**Підсистема моніторингу
якості атмосферного
повітря у кіберфізичній
системі «Розумне місто»**

Студент Владислав Барановський
Керівник к.т.н., доц. Іванов О.В.

- ▶ **Мета кваліфікаційної роботи** - моніторинг якості атмосферного повітря, зокрема, автоматичний контроль за рівнем вологості, температури, вмісту пилу, в тому числі частинок PM2.5, PM10, радіаційного фону, забруднення оксидами азоту, сіркою, вуглецевими сполуками, парниковими газами типу CO, CO₂, NH₃, NO тощо, а також інших шкідливих речовин шляхом створення підсистеми моніторингу якості атмосферного повітря у кіберфізичній системі «Розумне місто»
- ▶ **Об'єкт дослідження** - процес моніторингу якості атмосферного повітря у кіберфізичній системі «Розумне місто»
- ▶ **Предмет дослідження** - метод та підсистема моніторингу якості атмосферного повітря у кіберфізичній системі «Розумне місто»

НАУКОВА НОВИЗНА ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

- ▶ **вперше розроблено метод моніторингу якості атмосферного повітря у кіберфізичній системі «Розумне місто»**, який відрізняється від відомих своєю орієнтованістю на реалізацію у вигляді підсистеми ефективного моніторингу якості атмосферного повітря у кіберфізичній системі «Розумне місто» і надає точну та актуальну інформацію про якість повітря, а також дозволяє приймати обґрунтовані рішення щодо сповіщення мешканців про небезпеку із наданням рекомендацій щодо захисту їх здоров'я
- ▶ **вперше розроблено архітектуру підсистеми моніторингу якості атмосферного повітря у кіберфізичній системі «Розумне місто»**, яка відрізняється від відомих нижчою ціною, вищою точністю, простотою у використанні та виконує збір даних з встановлених датчиків вимірювання параметрів повітря, обробку та аналіз отриманих даних в реальному часі, візуалізацію результатів моніторингу якості повітря у вигляді карти міста з n районів із відображенням всіх параметрів повітря з адаптацією візуалізації результатів під потреби користувача, а також сигналізацію про небезпеку в даному районі міста із наданням рекомендацій щодо захисту здоров'я мешканців в такому випадку

Практична значущість отриманих результатів

- ▶ полягає у реалізації підсистеми моніторингу якості атмосферного повітря у кіберфізичній системі «Розумне місто», яка забезпечує збір даних з встановлених датчиків, візуалізацію результатів моніторингу якості повітря та сигналізацію про небезпеку в даному районі міста із наданням рекомендацій щодо захисту здоров'я мешканців в такому випадку

ПУБЛІКАЦІЯ

- ▶ Т. Novorushchenko, V. Baranovskyi, O. Ivanov, A. Hnatchuk. Subsystem for monitoring atmospheric air quality in the cyber-physical system "Smart city". Computer systems and information technologies. 2024. №1 Стаття у фаховому науковому журналі України категорії Б

Актуальність дослідження

- ▶ Основною метою «розумного міста» є створення життєздатного, екологічно чистого, ефективного та інноваційного середовища для проживання людей
- ▶ Забруднення повітря - це наявність у атмосферному повітрі різних шкідливих речовин, які можуть бути викинуті в результаті промислової, транспортної, агропромислової та інших людських діяльностей.
- ▶ Забруднення повітря є серйозною екологічною проблемою в нашому повсякденному житті.
- ▶ Погіршення якості повітря негативно впливає на здоров'я населення та навколишнє середовище.
- ▶ Моніторинг якості атмосферного повітря в кіберфізичній системі «Розумне місто» відіграє ключову роль у забезпеченні здоров'я та комфорту мешканців, а також у збереженні навколишнього середовища.
- ▶ Отже, безперервний автоматичний моніторинг якості атмосферного повітря у кіберфізичній системі «Розумне місто» є *актуальною задачею*.

Постановка задачі

Для розроблення підсистеми моніторингу якості атмосферного повітря у кіберфізичній системі «Розумне місто» слід розв'язати наступні задачі:

- ▶ аналіз відомих методів та рішень для моніторингу якості атмосферного повітря;
- ▶ моделювання процесу моніторингу якості атмосферного повітря у кіберфізичній системі «Розумне місто»;
- ▶ розроблення методу моніторингу якості атмосферного повітря;
- ▶ розроблення архітектури підсистеми моніторингу якості атмосферного повітря кіберфізичної системи «Розумне місто»;
- ▶ проведення експериментів із використанням розробленої підсистеми моніторингу якості атмосферного повітря кіберфізичної системи «Розумне місто».

Вибір складових частин підсистеми моніторингу якості атмосферного повітря кіберфізичної системи «Розумне місто»

Датчик температури та вологості повітря SHT20



Датчик вимірювання рівнів оксидів азоту Figaro TGS 2600



Датчик вмісту пилу у повітрі Nova PM SDS011



Датчик радіаційного фону Radex RD1503



Датчик вимірювання рівнів оксидів сірки та вуглеводнів Horiba APDA-372



Датчик вимірювання рівнів парникових газів SGX Sensortech MiCS-VZ-86



IoT-контролер ESP32



Моделювання процесу моніторингу якості атмосферного повітря у кіберфізичній системі «Розумне місто»

Перелік показників та забруднювачів атмосферного повітря, які будуть в фокусі уваги процесу моніторингу якості атмосферного повітря у кіберфізичній системі «Розумне місто»:

- ▶ вологість повітря - показник;
- ▶ температура повітря - показник;
- ▶ вміст пилу у повітрі, в т.ч. частинок PM 2.5, PM10 - забруднювачі;
- ▶ радіаційний фон повітря - забруднювач;
- ▶ рівень забруднення повітря оксидами азоту - забруднювач;
- ▶ рівень забруднення повітря сіркою та її сполуками - забруднювач;
- ▶ рівень забруднення повітря вуглецевими сполуками - забруднювач;
- ▶ рівень забруднення повітря парниковими газами CO, CO₂, NH₃, NO - забруднювачі.

Нехай $adcth$ - нормальне значення вмісту пилу у повітрі, а adc_i - значення вмісту пилу у повітрі даного району з множини значень вмісту пилу у повітрі $ADC = \{adc_1, adc_2, \dots, adc_n\}$, тоді **критерій забруднення повітря пилом** має вигляд:

- якщо $adc_i > adcth$, то вміст пилу у повітрі перевищує норму;
- якщо $adc_i \leq adcth$, то вміст пилу у повітрі не перевищує норму.

Аналогічно розроблено критерії забруднення повітря усіма іншими 10 забруднювачами.

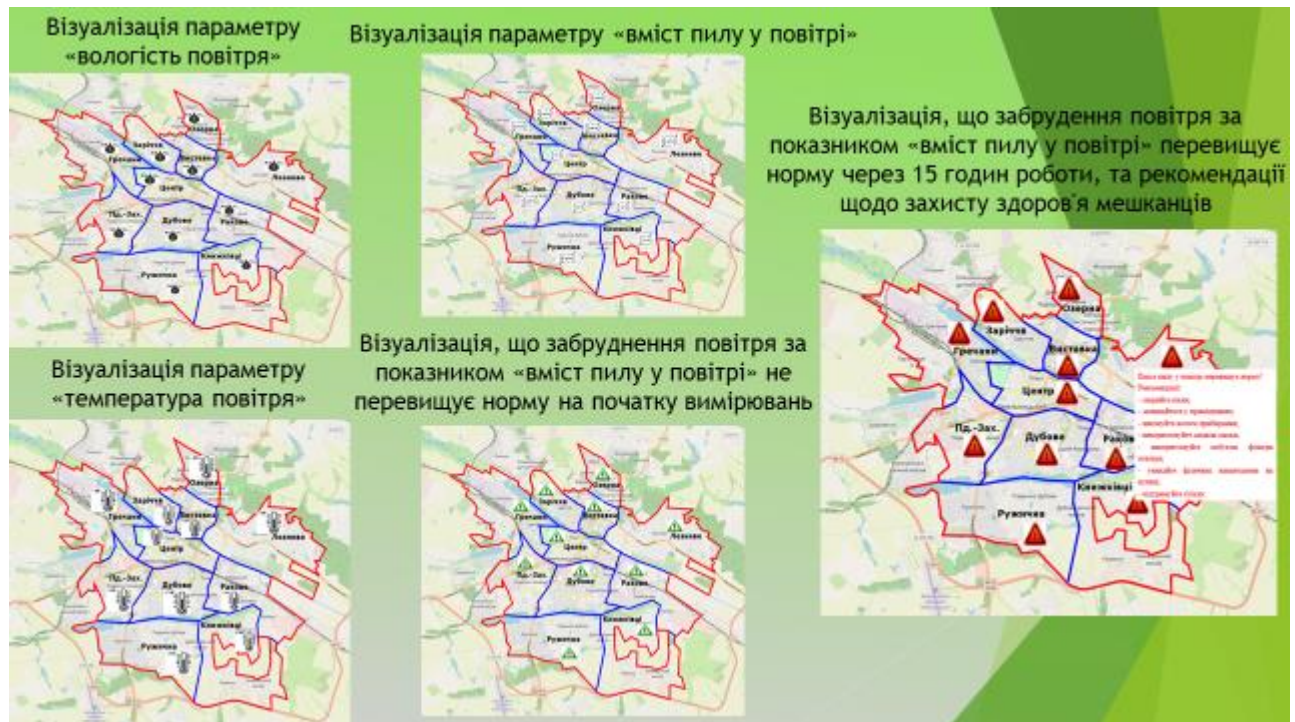
Враховуючи представлені критерії забруднення повітря різними речовинами, **загальне правило для прийняття рішення щодо перевищення/неперевищення норми рівня забруднення повітря одним чи декількома забруднювачами** матиме вигляд:

- якщо $adci > adcth$ та/або $apmmi > apmmth$ та/або $apmti > apmtth$ та/або $arbi > arbth$ та/або $anoi > anoth$ та/або $asi > asth$ та/або $acci > accth$ та/або $acoi > acoth$ та/або $acooi > acooth$ та/або $anhi > anhth$ та/або $anaoi > anaoth$, то рівень забруднення повітря одним чи декількома забруднювачами перевищує норму;
- якщо $adci \leq adcth$ та $apmmi \leq apmmth$ та $apmti \leq apmtth$ та $arbi \leq arbth$ та $anoi \leq anoth$ та $asi \leq asth$ та $acci \leq accth$ та $acoi \leq acoth$ та $acooi \leq acooth$ та $anhi \leq anhth$ та $anaoi \leq anaoth$, то рівень забруднення повітря жодним забруднювачем не перевищує норму.

Метод моніторингу якості атмосферного повітря у кіберфізичній системі «Розумне місто»:

- ▶ **задання множини нормальних значень параметрів повітря:** вмісту пилу у повітрі (adc_{th}), в т. ч. PM2.5 (apm_{mth}), PM10 (apm_{tth}), радіаційного фону повітря (arb_{th}), рівня забруднення повітря оксидами азоту (ano_{th}), рівня забруднення повітря сіркою (ast_{th}), рівня забруднення повітря вуглецевими сполуками (acc_{th}), рівня забруднення повітря парниковими газами CO (aco_{th}), CO2 ($aco_{o_{th}}$), NH3 (anh_{th}), NO ($ana_{o_{th}}$): $APTH = \{ap_{th_1}, ap_{th_2}, \dots, ap_{th_n}\} = \{adc_{th}, apm_{mth}, apm_{tth}, arb_{th}, ano_{th}, ast_{th}, acc_{th}, aco_{th}, aco_{o_{th}}, anh_{th}, ana_{o_{th}}\}$, по перевищенню яких відбувається сповіщення мешканців міста про небезпеку та надання рекомендацій щодо захисту їх здоров'я;
- ▶ **розміщення датчиків** - систематичне розташування обраних датчиків для вимірювання ключових параметрів якості повітря у різних районах міста для забезпечення репрезентативності та охоплення всієї території міста;
- ▶ **збір даних з встановлених датчиків, підключених у мережу Інтернету речей:**
 - ▶ формування множини значень вологості повітря $AH = \{ah_1, ah_2, \dots, ah_n\}$ на основі даних, отриманих з n датчиків вологості повітря, розташованих в n районах міста;
 - ▶ формування множини значень температури повітря $AT = \{at_1, at_2, \dots, at_n\}$ на основі даних, отриманих з n датчиків температури повітря, розташованих в n районах міста;
 - ▶ формування множини значень вмісту пилу у повітрі $ADC = \{adc_1, adc_2, \dots, adc_n\}$ на основі даних, отриманих з n датчиків вмісту пилу у повітрі, розташованих в n районах міста;
 - ▶ ... (і так далі)

- ▶ **передача зібраних даних в реальному часі** із застосуванням мережі Інтернету речей до серверу обробки даних;
- ▶ **обробка та аналіз отриманих даних в реальному часі** - з метою поточного моніторингу якості атмосферного повітря;
- ▶ **візуалізація результатів моніторингу якості повітря** - у вигляді карти міста з n районів із графічним відображенням всіх параметрів повітря;
- ▶ **вибір параметрів повітря користувачем** - вибір параметрів повітря, які цікавлять користувача (користувач може обрати від 1 до 13 вищеописаних параметрів);
- ▶ **визначення, чи перевищує норму рівень забруднення повітря одним чи декількома забруднювачами**, які цікавлять користувача;
- ▶ **адаптація візуалізації результатів моніторингу якості повітря під потреби користувача** - у вигляді карти міста з n районів із графічним відображенням тих параметрів повітря, які цікавлять користувача:
 - ▶ якщо на кроці 7 користувач обрав параметр «вологість повітря», то користувачу формується карта міста з n районів, на кожному з яких наведено відповідне значення вологості повітря даного району з множини значень вологості повітря $AH = \{ah_1, ah_2, \dots, ah_n\}$;
 - ▶ якщо на кроці 7 користувач обрав параметр «температура повітря», то користувачу формується карта міста з n районів, на кожному з яких наведено відповідне значення температури повітря даного району з множини значень температури повітря $AT = \{at_1, at_2, \dots, at_n\}$;
 - ▶ якщо на кроці 7 користувач обрав параметр «вміст пилу у повітрі», то користувачу формується карта міста з n районів, на кожному з яких наведено відповідне значення вмісту пилу у повітрі даного району з множини значень вмісту пилу у повітрі $ADC = \{adc_1, adc_2, \dots, adc_n\}$; якщо у i -му районі міста $adc_i > adc_{th}$, то мобільний додаток, який працює в фоновому режимі, видає звуковий сигнал, а на зображенні району на карті міста в додатку з'являється миготливий знак ▲, який сигналізує про небезпеку в даному районі міста; натискання на цей знак виводить на екран сповіщення: «Вміст пилу у повітрі перевищує норму» та рекомендації щодо захисту здоров'я мешканців в такому випадку
 - ▶ ... (і так далі)



ВИСНОВКИ

У роботі за результатами виконаних теоретичних та практичних досліджень забезпечено моніторинг якості атмосферного повітря, зокрема, автоматичний контроль за рівнем вологості, температури, вмісту пилу, в тому числі частинок PM2.5, PM10, радіаційного фону, забруднення оксидами азоту, сіркою, вуглецевими сполуками, парниковими газами типу CO, CO₂, NH₃, NO тощо, а також інших шкідливих речовин:

- ▶ у першому розділі проведений аналіз відомих методів та рішень для моніторингу якості атмосферного повітря у кіберфізичній системі «Розумне місто», зокрема, проаналізовано кіберфізичні системи «Розумне місто», а також відомі рішення моніторингу якості атмосферного повітря;
- ▶ у другому розділі вибір датчиків для формування нижнього рівня підсистеми моніторингу якості атмосферного повітря кіберфізичної системи «Розумне місто», вибір контролера для формування середнього рівня підсистеми, а також вибір стандарту для передачі даних для налагодження зв'язку між компонентами всіх трьох рівнів підсистеми. Крім цього, проведено моделювання процесу моніторингу якості атмосферного повітря у кіберфізичній системі «Розумне місто»;

- ▶ у третьому розділі розроблені метод та алгоритм моніторингу якості атмосферного повітря у кіберфізичній системі «Розумне місто», які становлять основу для ефективного моніторингу якості атмосферного повітря у кіберфізичній системі «Розумне місто» і дозволяють приймати обґрунтовані рішення щодо сповіщення мешканців про небезпеку із наданням рекомендацій щодо захисту їх здоров'я;
- ▶ у четвертому розділі вперше розроблено архітектуру підсистеми моніторингу якості атмосферного повітря у кіберфізичній системі «Розумне місто», яка виконує збір даних з встановлених датчиків вимірювання параметрів повітря, обробку та аналіз отриманих даних в реальному часі, візуалізацію результатів моніторингу якості повітря у вигляді карти міста з n районів із відображенням всіх параметрів повітря з адаптацією візуалізації результатів під потреби користувача, а також сигналізацію про небезпеку в даному районі міста із наданням рекомендацій щодо захисту здоров'я мешканців в такому випадку.



Ім'я користувача:
Кафедра КІ

Дата перевірки:
18.04.2024 22:59:39 EEST

Дата звіту:
18.04.2024 23:00:34 EEST

ID перевірки:
1016199444

Тип перевірки:
Doc vs Internet + Library

ID користувача:
100005591

Назва документа: Барановський_Підсистема моніторингу якості атмосферного повітря у кіберфізичній систе...

Кількість сторінок: 102 Кількість слів: 22960 Кількість символів: 170138 Розмір файлу: 6.49 MB ID файлу: 1015966264

11.8% Схожість

Найбільша схожість: 7.57% з джерелом з Бібліотеки (ID файлу: 1015858615)

3.4% Джерела з Інтернету 341 Сторінка 104

9.47% Джерела з Бібліотеки 58 Сторінка 107

0.49% Цитат

Цитати 16 Сторінка 108

Посилання 1 Сторінка 108

0% Вилучень

Немає вилучених джерел

Модифікації

Виявлено модифікації тексту. Детальна інформація доступна в онлайн-звіті.

Замінені символи 13

Anti-Plagiarism v-15.257

Максимальне співпадіння з одним документом 1.0%

Словники перевірки: en_US, ru_RU, ua_UA. Помилки в документах: 12%

| | | | | |
|---|----------|---------|-----------------------------|---------|
| ID: 125380 Назва: МКР Підсистема моніторингу якості атмосферного повітря у кіберфізичній системі «Розумне місто» Додано в БД: 2024-04-18 Автора: Барановський В.В. Керівники: Іванов О.В. Консультанти: Опоненти: | Документ | | Сумарний збіг по Базі Даних | |
| | Символи | Лексеми | Символи | Лексеми |
| | 156298 | 653 | 2212 (1%) | 24 (4%) |

Джерело плагіату

| ID | Опис | Наявність плагіату в документі | |
|----|------|--------------------------------|---------|
| | | Символи | Лексеми |
| | | | |

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

РЕЦЕНЗІЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Дипломник: Барановський Владислав Володимирович

Тема: Підсистема моніторингу якості атмосферного повітря у кіберфізичній системі «Розумне місто»

Спеціальність: 123 «Комп'ютерна інженерія»

Обсяг дипломної роботи:

Кількість сторінок записки 118 с.

1. Короткий зміст роботи та прийнятих рішень: Метою кваліфікаційної роботи є моніторинг якості атмосферного повітря, зокрема, автоматичний контроль за рівнем вологості, температури, вмісту пилу, в тому числі частинок PM2.5, PM10, радіаційного фону, забруднення оксидами азоту, сіркою, вуглецевими сполуками, парниковими газами типу CO, CO₂, NH₃, NO тощо, а також інших шкідливих речовин шляхом створення підсистеми моніторингу якості атмосферного повітря у кіберфізичній системі «Розумне місто».

2. Висновок про відповідність роботи дипломному завданню: Робота повністю відповідає поставленому завданню.

3. Характеристика виконання кожного розділу, ступінь використання останніх досягнень науки і техніки і передових методів роботи: У першому розділі проведений аналіз відомих методів та рішень для моніторингу якості атмосферного повітря у кіберфізичній системі «Розумне місто», зокрема, проаналізовано кіберфізичні системи «Розумне місто», а також відомі рішення моніторингу якості атмосферного повітря. У розділі 2 кваліфікаційної роботи виконано вибір датчиків для формування нижнього рівня підсистеми моніторингу якості атмосферного повітря кіберфізичної системи «Розумне місто». Крім цього, у розділі 2 кваліфікаційної роботи виконано вибір контролера для формування середнього рівня підсистеми моніторингу якості атмосферного повітря кіберфізичної системи «Розумне місто» та вибір стандарту передачі даних. Враховуючи визначені забруднювачі атмосферного повітря, які будуть в фокусі уваги процесу моніторингу якості атмосферного повітря у кіберфізичній системі «Розумне місто», в розділі 2 кваліфікаційної роботи розроблені критерії забруднення повітря різними забруднювачами, а також загальне правило для

прийняття рішення щодо перевищення/неперевищення норми рівня забруднення повітря одним чи декількома забруднювачами. В розділі 3 кваліфікаційної роботи розроблений метод моніторингу якості атмосферного повітря у кіберфізичній системі «Розумне місто», який становить основу для ефективного моніторингу якості атмосферного повітря у кіберфізичній системі «Розумне місто» і дозволяє приймати обґрунтовані рішення щодо сповіщення мешканців про небезпеку із наданням рекомендацій щодо захисту їх здоров'я. В розділі 4 кваліфікаційної роботи вперше розроблено архітектуру підсистеми моніторингу якості атмосферного повітря у кіберфізичній системі «Розумне місто». Розроблена підсистема моніторингу якості атмосферного повітря у кіберфізичній системі «Розумне місто» виконує збір даних з встановлених датчиків вологості повітря, температури повітря, вмісту пилу у повітрі, в т. ч. частинок PM2.5, PM10, радіаційного фону повітря, рівня забруднення повітря оксидами азоту, рівня забруднення повітря сіркою, рівня забруднення повітря вуглецевими сполуками, рівня забруднення повітря парниковими газами CO, CO₂, NH₃, NO, передачу зібраних даних в реальному часі до сервера обробки даних, обробку та аналіз отриманих даних в реальному часі з використанням різних аналітичних методів, візуалізацію результатів моніторингу якості повітря у вигляді карти міста з n районів із відображенням всіх параметрів повітря.

4. Позитивні сторони роботи: отримання двох пунктів наукової новизни.

5. Негативні сторони роботи:

6. Оцінка графічного оформлення та пояснювальної записки роботи: Пояснювальна записка оформлена коректно, згідно з діючими стандартами оформлення документації.

7. Відгук про роботу в цілому: Робота виконана на середньому науково-технічному рівні.

8. Інші зауваження: _____

9. Оцінка дипломної роботи: добре/В.

Рецензент (прізвище, ім'я, по батькові, посада, місце роботи) Баунак О.В.,
д.т.н., проф., зав. кафедрою комп'ютерних наук

« 22 » 04 2024 р.

 (підпис)

Завідувачу кафедри КПС
д-р.техн.наук, проф. Говорущенко Т. О.

Барановського Владислава Володимировича
ГІБ здобувача вищої освіти

ФІТ, 2 курсу, групи КІ2М-22-2

ЗАЯВА

З правилами чинного Положення «Про систему забезпечення академічної доброчесності у Хмельницькому національному університеті», згідно з яким виявлення плагіату є підставою для відмови в допуску кваліфікаційної роботи до захисту та застосування заходів дисциплінарної та академічної відповідальності, ознайомлений (а). Про використання програмно-технічних засобів для перевірки кваліфікаційних робіт здобувачів вищої освіти на плагіат оповіщений(а) та надаю свою згоду на обробку та збереження університетом моєї роботи в інституційному репозитарії університету.

Також надаю університету право на передачу моєї роботи для обробки та збереження в базах даних програмно-технічних засобів (Unicheck та Anti-Plagiarism) та використання роботи для виявлення плагіату в інших роботах, які перевіряються програмно-технічними засобами та користувачами, що мають доступ до цих програмно-технічних засобів, виключно в обмежених цілях для виявлення плагіату в текстах робіт.

Робота для перевірки університетом надається в друкованому та електронному варіанті. Електронна версія моєї роботи збігається (ідентична) з друкованою.

17 квітня 2024 року

РІШЕННЯ ЕКСПЕРТНОЇ КОМІСІЇ
КАФЕДРИ КОМП'ЮТЕРНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ
ПРО ДОПУСК КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ ДО ЗАХИСТУ

Підтверджуємо ознайомлення з результатом звіту подібності щодо роботи, генерованою системою виявлення текстових збігів/ідентичності/схожості:

Назва: Підсистема моніторингу якості атмосферного повітря у кіберфізичній системі «Розумне місто»

Автор: Барановський Владислав Володимирович

Спеціальність: 123 – Комп'ютерна інженерія

Освітня програма: освітньо-наукова

Науковий керівник: Іванов Олексій Валентинович, к.т.н, доцент

Після аналізу звіту подібності зроблено такий висновок:

| № | Висновок | Позначка про відповідність |
|---|---|----------------------------|
| 1 | Запозичення, виявлені в роботі, є законними і не є плагіатом. Робота приймається до захисту. | відповідає |
| 2 | Виявлені запозичення не є плагіатом, розміщені в розділах, які не описують безпосередньо авторське дослідження, але кількість цитат перевищує обсяг, виправданий поставленою метою роботи. Робота приймається до захисту, але має бути відкоригована. Відкоригований варіант має бути поданий на кафедру за 2 дні до захисту, разом із заявою щодо самостійності виконання письмової роботи та ідентичності друкованої та електронної версії роботи | |
| 3 | Виявлені запозичення не є плагіатом, але частково розміщені в розділах, які описують безпосередньо авторське дослідження, а кількість цитат перевищує обсяг, виправданий поставленою метою роботи. В зв'язку з цим мета роботи та поставлені завдання не були досягнені. Робота може бути допущена до захисту (наступного року) після того як буде відкоригована та дорацьована і успішно пройде повторну перевірку на академічний плагіат. | |
| 4 | Робота містить навмисні текстові спотворення, передбачувані спроби укриття запозичень або інші прояви академічного плагіату. Робота містить фабрикацію або фальсифікацію даних. Робота не допускається до захисту. | |

Підтвердження:

Запозичення, виявлені в роботі, є законними і не є плагіатом, оскільки:

- 1) запозичення розміщені в розділах аналізу існуючих аналогів та прототипів, які не описують безпосередньо авторське дослідження і не стосуються результатів роботи;
- 2) усі запозичення фрагментарні, або мають належним чином оформленні посилання;
- 3) найбільшу схожість встановлено з одним документом (статтею, співавтором якої є Барановський В.В., за тематикою його дослідження) і становить вона 7.57%;
- 4) всі зафіксовані системою ознаки модифікації тексту відносяться до комбінування латинських символів зі україномовними скороченнями індексів в формулах, що не є модифікацією тексту

Сумарний обсяг всіх запозичень, визначений системою виявлення збігів/ідентичності/схожості, складає 11.8% і адресується до 399 періодичерел, що, з урахуванням наведених обґрунтувань, відповідає характеру наукового дослідження і свідчить на користь кваліфікаційної роботи.

Керівник роботи

О. В. Іванов

Гарант ОНП

О. С. Савенко

Завідувач кафедри КПС

Т. О. Говорушенко