

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 «Метод та кіберфізична система відстежування і аналізу викидів вуглецю (CO<sub>2</sub>) у атмосферу»

КвРКІП. 2301146.23.02.02 ПЗ

Виконав: студент 2 курсу, група КІ2м-23-1

  
Підпис

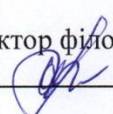
Костянтин БАГРІЙ  
Ім'я, прізвище

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

  
Підпис

Катерина БЕРЕЗЬКА  
Ім'я, прізвище

До захисту допускаю:  
Зав. кафедри КІС, доктор філософії, доцент

Ольгам ПАВЛОВА   
19 05 2025 р.

Хмельницький, 2025

# 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 Ольга ПАВЛОВА

“ 01 ” 09 2024 р.

## ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ МАГІСТРА

Костянтину БАГРІЮ

Прізвище, ім'я, по батькові студента

1. Тема проекту (роботи) Метод та кіберфізична система відстежування і аналізу викидів вуглецю (CO<sub>2</sub>) у атмосфері

Керівник проекту (роботи) Катерина БЕРЕЗЬКА, к.т.н., доцент

Прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання

Затверджена наказом ректора університету від 08.01.2025 №8

2. Строк подання студентом проекту (роботи) на кафедру 01.05.2025 р.

3. Вихідні дані до проекту (роботи) Завдання на дипломне проектування

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) \_\_\_\_\_

Аналіз відомих методів для відстежування викидів вуглецю CO<sub>2</sub>

Аналіз відомих методів для аналізу даних, отриманих в процесі відстежування викидів вуглецю CO<sub>2</sub>

Моделювання процесів відстежування та аналізу даних викидів вуглецю CO<sub>2</sub>

Метод відстежування та аналізу даних викидів вуглецю CO<sub>2</sub>

Кіберфізична система відстежування та аналізу викидів вуглецю CO<sub>2</sub> у атмосфері

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

6. Консультанти розділів кваліфікаційної роботи магістра

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Нормоконтроль	Сергій ЛИСЕНКО, професор кафедри КПС		
Антиплагіат	Андрій НІЧЕПОРУК, доцент кафедри КПС		

7. Дата видачі завдання « 01 » 09 2024р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№з/п	Назва етапів (розділів) кваліфікаційної роботи магістра	Термін виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1	Вибір напрямку дослідження та узгодження тематики КвРМ з керівником	01.09.2024	виконано
2	Ознайомлення з предметною областю; формулювання мети та задач дослідження; визначення об'єкта та предмета дослідження	01.10.2024	виконано
3	Робота над розділом 1 – аналіз відомих моделей, методів за темою; постановка задачі	01.11.2024	виконано
4	Робота над розділом 2 – розробка моделей для вирішення поставленої задачі	01.12.2024	виконано
5	Робота над науковою статтею	01.02.2025	виконано
6	Робота над розділом 3 – розробка методів для вирішення поставленої задачі	15.02.2025	виконано
7	Робота над розділом 4 – проектування та розробка ПЗ для вирішення поставленої задачі, експериментальна частина	01.04.2025	виконано
8	Оформлення пояснювальної записки згідно вимог	18.04.2025	виконано
9	Попередній захист ДРМ	29.04.2025	виконано
10	Захист ДРМ на засіданні ЕК	До 15.05.2025	

Студент

  
Підпис

Костянтин БАГРІЙ

Ім'я, прізвище

Керівник роботи

  
Підпис

Катерина БЕРЕЗЬКА

Ім'я, прізвище

## РЕФЕРАТ

Тема кваліфікаційної роботи магістра: Метод та кіберфізична система відстежування і аналізу викидів вуглецю (CO<sub>2</sub>) у атмосферу

Автор роботи: Багрій Костянтин Олександрович

Керівник роботи: Березька Катерина Миколаївна

Пояснювальна записка: 95 с., 23 рис., 9 табл., 2 дод., 82 джерела.

КІБЕРФІЗИЧНА СИСТЕМА, ВИКИДИ ВУГЛЕЦЮ, СЕНСОРИ, ЦІЛІ СТАЛОГО РОЗВИТКУ, МЕТОДИ МОНІТОРИНГУ, ТРАНСПОРТНИЙ ЗАСІБ.

Об'єктом дослідження є процес відстежування і аналізу викидів вуглецю (CO<sub>2</sub>) у атмосферу.

Предметом дослідження є кіберфізична система відстежування і аналізу викидів вуглецю (CO<sub>2</sub>) у атмосферу.

Метою кваліфікаційної роботи магістра є забезпечення моніторингу в режимі реального часу викидів вуглецю (CO<sub>2</sub>) в атмосферу за рахунок методу та кіберфізичної системи відстежування і аналізу викидів вуглецю у атмосферу з фокусом на транспортний сектор у середніх містах України, що сприятиме зменшенню шкідливого впливу на навколишнє середовище.

Для розв'язання поставлених задач використовувалися методи аналізу даних, цифрового моделювання та елементів машинного навчання, інтегровані в рамках кіберфізичної системи.

Наукова новизна отриманих результатів:

- розроблено новий метод відстежування і аналізу викидів вуглецю CO<sub>2</sub> у атмосферу, який дозволяє відстежувати та опрацьовувати дані в режимі реального часу на різних локаціях;
- запропоновано архітектуру кіберфізичної системи відстежування і аналізу викидів вуглецю CO<sub>2</sub> у атмосферу, зі стаціонарними сенсорами, яка працює в реальному часі.

На основі проведених досліджень розроблений метод та кіберфізична система і компоненти програмного забезпечення цієї системи.

Практична значимість отриманих результатів полягає у розробленому програмному забезпеченні відстежуванні та аналізу викидів вуглецю в режимі реального часу та видачі відповідних рекомендацій оператору.

У вступі подано об'єкт та предмет дослідження, мету, наукову новизну та практичну цінність роботи, а також характеристику структури роботи.

У першому розділі проведено аналіз відомих рішень щодо методів та засобів відстежування і аналізу викидів вуглецю (CO<sub>2</sub>) у атмосферу та дослідження впливу автомобільного транспорту на зміну клімату та забруднення атмосфери.

У другому розділі розглянуто процеси відстежування та аналізу викидів вуглецю CO<sub>2</sub> у атмосферу та запропоновано модель процесу відстежування і аналізу викидів вуглецю CO<sub>2</sub> у атмосферу. **Ошибка! Закладка не определена.**

У третьому розділі здійснено проектування кіберфізичної системи відстежування та аналізу викидів вуглецю CO<sub>2</sub> в атмосферу від транспортної галузі м.Хмельницького та запропоновано метод відстежування та аналізу вуглецю CO<sub>2</sub>.

У четвертому розділі здійснено розроблення основних модулів кіберфізичної системи, а також проведено експеримент та узагальнено результати. На основі цих результатів показано рекомендації, які сформувала система.

У висновках підведено підсумки досягнення результатів з розв'язання завдань дослідження.

## ЗМІСТ

<b>СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ .....</b>	<b>5</b>
<b>ВСТУП .....</b>	<b>6</b>
<b>1 АНАЛІЗ ВІДОМИХ МЕТОДІВ ТА РІШЕНЬ .....</b>	<b>9</b>
1.1 Огляд та аналіз предметної галузі .....	9
1.2 Відомі методи та засоби відстежування і аналізу викидів вуглецю (CO <sub>2</sub> ) у атмосферу .....	13
1.3 Дослідження впливу автомобільного транспорту на зміну клімату та забруднення атмосфери.....	17
1.4 Постановка задачі.....	22
1.5 Висновки .....	24
<b>2 МОДЕЛЬ ПРОЦЕСУ ВІДСТЕЖУВАННЯ І АНАЛІЗУ ВИКИДІВ ВУГЛЕЦЮ CO<sub>2</sub> У АТМОСФЕРУ .....</b>	<b>25</b>
2.1 Процес відстежування викидів вуглецю CO <sub>2</sub> у атмосферу.....	25
2.2 Процес аналізу викидів вуглецю CO <sub>2</sub> у атмосферу .....	29
2.3 Модель процесу відстежування і аналізу викидів вуглецю CO <sub>2</sub> у атмосферу .....	35
2.4 Математична модель процесу відстежування та аналізу викидів CO <sub>2</sub> .....	40
2.5 Висновки .....	45
<b>3 МЕТОД ВІДСТЕЖУВАННЯ І АНАЛІЗУ ВИКИДІВ ВУГЛЕЦЮ В АТМОСФЕРУ .....</b>	<b>47</b>
3.1 Аналіз існуючих методів обліку викидів вуглецю CO <sub>2</sub> в атмосферу .....	47
3.2 Відстежування та аналіз викидів вуглецю CO <sub>2</sub> від транспорту м.Хмельницький .....	52

3.3	Проектування кіберфізичної системи відстежування та аналізу викидів CO <sub>2</sub> у атмосферу .....	54
3.4	Метод відстежування і аналізу викидів CO <sub>2</sub> в кіберфізичній системі .....	66
3.5	Висновки .....	70
<b>4</b>	<b>КІБЕРФІЗИЧНА СИСТЕМА ВІДСТЕЖУВАННЯ ТА АНАЛІЗУ ВИКИДІВ ВУГЛЕЦЮ CO<sub>2</sub> У АТМОСФЕРУ .....</b>	<b>72</b>
4.1	Вибір типу архітектури та зразків проектування .....	72
4.2	Розробка архітектури програмного забезпечення кіберфізичної системи відстежування та аналізу викидів CO <sub>2</sub> у атмосферу .....	74
4.2.1	Діаграма варіантів використання для програмного забезпечення .....	76
4.2.2	Діаграма класів програмного забезпечення .....	80
4.2.3	Діаграма станів програмного забезпечення .....	82
4.3	Інтерфейс програмного забезпечення кіберфізичної системи відстежування та аналізу викидів CO <sub>2</sub> у атмосферу .....	85
4.4	Приклади роботи кіберфізичної системи відстежування та аналізу викидів CO <sub>2</sub> .....	89
4.5	Висновки .....	96
	<b>ВИСНОВКИ .....</b>	<b>98</b>
	<b>ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ .....</b>	<b>101</b>
	<b>ДОДАТОК А</b> Наукова праця здобувача .....	<b>111</b>
	<b>ДОДАТОК Б</b> Презентація роботи .....	<b>116</b>

## СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ

БД - база даних

ІЧ - інфрачервоний

КФС - кіберфізична система

МПР - модуль прийняття рішень

ПГ - парникові гази

ПЗ - програмне забезпечення

ТЕС - теплова електростанція

ТЗ - транспортний засіб

ЦСР - цілі сталого розвитку

ШІ - штучний інтелект

СЕМС - системи безперервного контролю викидів

ІоТ - інтернет речей

PRTR - Pollutant release and transfer register (реєстр викидів та перенесення забруднюючих речовин)

## ВСТУП

Актуальність відстежування і аналізу викидів вуглекислого газу (CO<sub>2</sub>) у атмосферу стрімко зростає через глобальні екологічні, соціальні та економічні виклики, пов'язані з кліматичними змінами. Викиди вуглекислого газу є одним із головних чинників глобального потепління, яке викликає зміни клімату. Підвищення температури планети призводить до катастрофічних наслідків, таких як екстремальні погодні умови (повені, посухи, урагани), танення льодовиків і підвищення рівня моря. Відстежування та аналіз викидів CO<sub>2</sub> допомагають ідентифікувати джерела надмірних викидів та вжити заходів для їх скорочення. Відстежування викидів CO<sub>2</sub> дозволяє підприємствам краще управляти своїми витратами, впроваджувати «зелені» технології та уникати фінансових санкцій за надмірні викиди. Відстежування викидів вуглекислого газу допомагає країнам і організаціям досягати цілей сталого розвитку (ЦСР), зокрема 13-ї цілі ООН щодо боротьби зі змінами клімату [1-3].

Отже, актуальність відстежування та аналізу викидів вуглецю (CO<sub>2</sub>) обумовлена необхідністю протидії глобальним змінам клімату, виконанням міжнародних кліматичних зобов'язань, забезпеченням сталого економічного розвитку та захистом здоров'я і добробуту людей. Ефективний моніторинг викидів CO<sub>2</sub> дає змогу вчасно впроваджувати необхідні заходи для зменшення впливу на довкілля та досягнення вуглецевої нейтральності. Тому задача розроблення кіберфізичної системи відстежування і аналізу викидів вуглецю (CO<sub>2</sub>) у атмосферу є актуальною та важливою.

Актуальність роботи полягає в розробці методу та кіберфізичної системи відстежування та аналізу викидів вуглецю CO<sub>2</sub> в атмосферу в режимі реального часу.

Метою цієї роботи є забезпечення моніторингу в режимі реального часу викидів вуглецю (CO<sub>2</sub>) в атмосферу за рахунок методу та кіберфізичної системи відстежування і аналізу викидів вуглецю у атмосферу з фокусом на транспортний

сектор у середніх містах України, що сприятиме зменшенню шкідливого впливу на навколишнє середовище.

Отже, для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

1. Провести аналіз відомих методів та рішень моніторингу викидів CO<sub>2</sub> та виявити їхні переваги і недоліки.
2. Змоделювати процес відстежування і аналізу викидів вуглецю CO<sub>2</sub> у атмосферу.
3. Сформувати архітектуру кіберфізичної системи для відстеження викидів.
4. Розробити метод відстежування і аналізу викидів вуглецю CO<sub>2</sub> у атмосферу.
5. Розробити архітектуру кіберфізичної системи відстежування і аналізу викидів вуглецю CO<sub>2</sub> у атмосферу.
6. Оцінити ефективність розробленої системи та визначити напрями її подальшого удосконалення.

Об'єктом дослідження є процес відстежування і аналізу викидів вуглецю (CO<sub>2</sub>) у атмосферу.

Предметом дослідження є кіберфізична система відстежування і аналізу викидів вуглецю (CO<sub>2</sub>) у атмосферу.

Наукова новизна отриманих результатів:

- розроблено новий метод відстежування і аналізу викидів вуглецю CO<sub>2</sub> у атмосферу, який дозволяє відстежувати та опрацьовувати дані в режимі реального часу на різних локаціях;
- запропоновано архітектуру кіберфізичної системи відстежування і аналізу викидів вуглецю CO<sub>2</sub> у атмосферу, зі стаціонарними сенсорами.

Практична значимість отриманих результатів полягає у розробленому програмному забезпеченні відстежуванні та аналізу викидів вуглецю в режимі реального часу та видачі відповідних рекомендацій оператору.

За темою кваліфікаційної роботи опубліковано одну публікацію [82] у Збірнику наукових праць за матеріалами Всеукраїнської науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «Інтелектуальні комп'ютерні системи та мережі» (Тернопіль – 2024. – С. 43-45).

## 1 АНАЛІЗ ВІДОМИХ МЕТОДІВ ТА РІШЕНЬ

### 1.1 Огляд та аналіз предметної галузі

Кліматичні зміни є однією з найгостріших загроз ХХІ століття, і ключовим чинником глобального потепління є надмірні викиди вуглекислого газу (CO<sub>2</sub>) в атмосферу. За даними Міжурядової групи експертів зі змін клімату (IPCC), антропогенні викиди CO<sub>2</sub> становлять понад три чверті усіх парникових газів, що спричиняють парниковий ефект [4]. Без системного підходу до моніторингу та аналізу цих викидів неможливо розробити ефективну кліматичну політику чи вжити заходів зі зменшення шкідливого впливу.

Тому, на сьогоднішній день нагальною та актуальною є необхідність вирішення глобальної проблеми досягнення вуглецевої нейтральності. Ця нагальність підкреслюється тим фактом, що лише 12% з Цілей сталого розвитку (ЦСР), включно з найважливішими кліматичними цілями, були реалізовані на половині шляху до реалізації Порядку денного ООН у сфері сталого розвитку до 2030 року [5]. Швидкий розвиток штучного інтелекту (ШІ) і кіберфізичних систем (КФС) відкрив інноваційні шляхи для вирішення цієї проблеми. Для вирішення цієї проблеми різні науковці досліджують потенціал ШІ та КФС у впровадженні ефективних стратегій декарбонізації у ключових секторах. Зокрема, важливим є розуміння, як ці технології можуть зменшити викиди парникових газів, оптимізувати використання енергії та сприяти сталому розвитку у таких важливих сферах, як виробництво електроенергії та тепла, транспорт, будівлі та міста, промисловість і сільське господарство [6].

Розглянемо основні галузі, де відстеження викидів CO<sub>2</sub> є особливо критичним. Насамперед, енергетичний сектор виступає головним джерелом антропогенних викидів. Основна проблема полягає у широкому використанні викопних видів палива, зокрема вугілля, нафти та природного газу.

Електростанції, промислові котельні та теплоелектроцентралі виділяють великі обсяги CO<sub>2</sub> у процесі спалювання, і саме тому ця галузь вимагає безперервного моніторингу та впровадження чистих технологій.

Промисловий сектор, включаючи виробництво цементу, сталі, скла та хімікатів, є ще однією критичною галуззю. Особливістю тут є те, що викиди виникають не лише через спалювання палива, а й у результаті хімічних реакцій, які є невід'ємною частиною виробничих процесів. Таким чином, навіть при переході на «зелену» енергію, частина викидів все одно залишатиметься, що вимагає застосування технологій уловлювання та зберігання вуглецю.

Транспорт, особливо автомобільний, авіаційний та морський, генерує велику кількість CO<sub>2</sub> через масове споживання викопного пального. Особливою проблемою є розпорошеність джерел викидів, що ускладнює централізований контроль. Важливо впроваджувати як системи моніторингу, так і стратегії електрифікації, альтернативного пального та покращення логістики.

Сільське господарство та землекористування також мають вагомий вплив. Тут викиди CO<sub>2</sub> зумовлені переважно вирубкою лісів, зміною природного ландшафту та деградацією ґрунтів. Особливістю є поєднання викидів з втратою природних поглиначів вуглецю, що подвійно ускладнює ситуацію. Для цієї галузі особливо важливе використання супутникових технологій та геоінформаційних систем.

Будівельна галузь, хоча й менш масштабна, все ж вимагає уваги через вуглецево-ємне виробництво будівельних матеріалів та енергоспоживання об'єктів упродовж усього життєвого циклу. Тут доцільне застосування екологічного дизайну та оцінка вуглецевого сліду ще на етапі проєктування.

Побутовий сектор, хоч і складається з мільйонів малих джерел, у сукупності спричиняє значний рівень викидів. Це стосується використання електроенергії, опалення, споживчої поведінки. Особливістю є можливість безпосереднього впливу громадян через зміну власних звичок та впровадження енергоефективних рішень.

Для забезпечення ефективного контролю викидів CO<sub>2</sub> необхідно системно оцінювати особливості кожної галузі, їхнє значення у загальній структурі викидів та доступні інструменти моніторингу. У таблиці 1.1 подано порівняльний аналіз

ключових секторів, що є пріоритетними для кліматичної політики та екологічного планування.

Таблиця 1.1 – Основні галузі моніторингу викидів CO<sub>2</sub>

Галузь	Частка глобальних викидів CO <sub>2</sub> (%)	Основні джерела викидів	Кількісні показники	Методи моніторингу	Примітка
Енергетика	≈ 41%	ТЕС (вугілля, газ, нафта)	Вугільна ТЕС: 820 г CO <sub>2</sub> /кВт·г од Газова ТЕС: 490 г CO <sub>2</sub> /кВт·год	CEMS-системи, супутники GHGSat, Sentinel-5P	Найбільший сектор-викидач
Промисловість	≈ 24%	Цемент, сталь, хімія	Цемент: до 0,9 т CO <sub>2</sub> /т продукції Сталь: 1,8–2,0 т CO <sub>2</sub> /т	Сенсори викидів, цифрові баланси маси	Викиди на одиницю продукту дуже високі
Транспорт	≈ 14%	Авто, авіація, морський транспорт	Авто: 120–200 г CO <sub>2</sub> /км Авіація: до 150 г/пас.·км Судна: 10–40 г/т·км	GPS, паливні звіти, сенсори, супутники	Динамічно зростає частка викидів

Кінець таблиці 1.1

Галузь	Частка глобальних викидів CO <sub>2</sub> (%)	Основні джерела викидів	Кількісні показники	Методи моніторингу	Примітка
Сільське господарство	≈ 6–7% (CO <sub>2</sub> частково)	Вирубка лісів, зміна землекористування	Вирубка: ≈ 3 млрд т CO <sub>2</sub> /рік	Супутниковий аналіз LandSat, інвентаризація ґрунтів	CO <sub>2</sub> — лише частина загальних аграрних викидів
Будівництво	≈ 6%	Виробництво матеріалів, енерговитрати	Життєвий цикл офісної будівлі: 500–1000 т CO <sub>2</sub>	ВІМ-моделі, LCA (аналіз життєвого циклу)	Потенціал до зниження за рахунок зелених технологій
Побутовий сектор	≈ 5–10%	Опалення, освітлення, споживання	Середній побутовий слід в ЄС ≈ 6 т CO <sub>2</sub> /рік на особу	Розумні лічильники, мобільні застосунки	Можна контролювати індивідуально через енергоефективність

Проведений порівняльний аналіз дозволяє зробити висновок, що контроль за викидами CO<sub>2</sub> є багатогалузевою проблемою, яка вимагає комплексного підходу. Найбільше навантаження на атмосферу формує енергетика, яка потребує переходу до відновлюваних джерел та модернізації інфраструктури. Промисловість, зокрема важка, вимагає впровадження технологій уловлювання вуглецю, а також зміни матеріалів і процесів виробництва.

Особливу увагу слід звернути на транспортну сферу, яка характеризується високою мобільністю джерел викидів та значною диференціацією за типами транспорту. Сільське господарство та землекористування – це галузі з великим потенціалом як щодо скорочення викидів, так і щодо підвищення поглинальної здатності екосистем. Будівництво та побутовий сектор, попри відносно меншу частку, мають великий потенціал для впровадження енергоефективних рішень на рівні окремих об'єктів і домогосподарств.

Таким чином, ефективне управління викидами CO<sub>2</sub> вимагає розробки галузевих стратегій із урахуванням специфіки джерел, доступних методів моніторингу та потенціалу скорочення. Такий підхід дозволить досягти цілей Паризької кліматичної угоди та забезпечити сталий розвиток.

## 1.2 Відомі методи та засоби відстежування і аналізу викидів вуглецю (CO<sub>2</sub>) у атмосферу

Для прийняття обґрунтованих рішень у сфері екологічної політики, енергетики та промисловості необхідно мати точні, надійні й систематизовані дані про джерела та обсяги викидів.

Сучасні технології дають змогу здійснювати вимірювання викидів як на локальному рівні (окремі підприємства, міста), так і на глобальному (за допомогою супутників). Існує широкий спектр методів: від прямого вимірювання газів у димових трубах до розрахункових моделей на основі енергоспоживання та супутникових знімків. Кожен із підходів має свої переваги та обмеження, а вибір конкретного методу залежить від поставлених завдань і доступної інфраструктури.

Розглянемо найвідоміші методи та засоби відстеження й аналізу викидів CO<sub>2</sub> у атмосферу, що активно застосовуються в наукових дослідженнях, державному управлінні та комерційних екологічних рішеннях (рисунок 1.1).

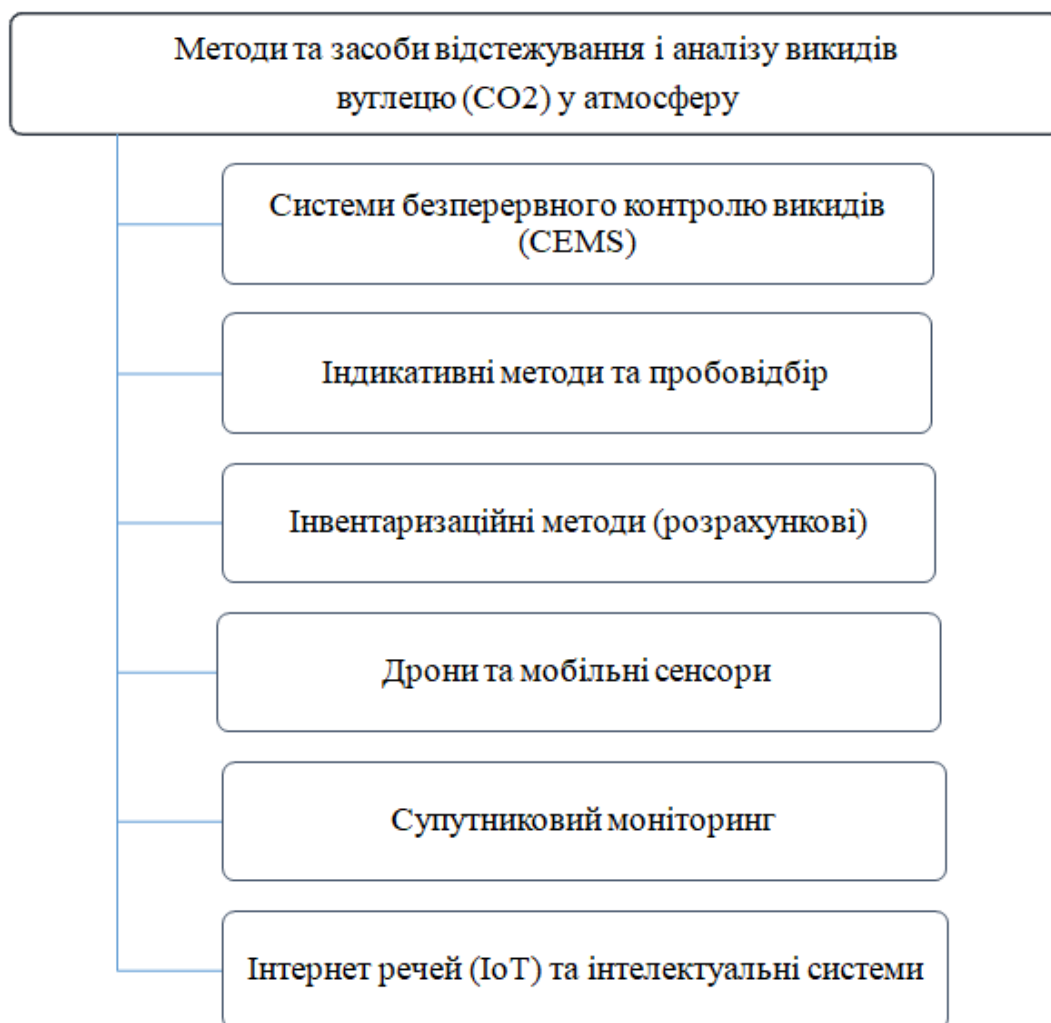


Рисунок 1.1 – Методи та засоби відстежування і аналізу викидів вуглецю (CO<sub>2</sub>) у атмосферу

Системи безперервного контролю викидів (CEMS) – це стаціонарні автоматизовані системи, які безперервно вимірюють концентрацію викидів у димових газах підприємств [5]. Вони зазвичай складаються з газоаналізаторів, систем відбору проб, кондиціонування газу, комп'ютерної системи збору та обробки даних. Застосовуються переважно на теплоелектростанціях (ТЕС), цементних заводах, в хімічній промисловості та в спалювальних установках. Наприклад, на Дніпровській ТЕС встановлена CEMS-система, яка щохвилини реєструє викиди CO<sub>2</sub> та SO<sub>2</sub> і передає ці дані в систему екомоніторингу області.

Перевагами використання таких систем є висока точність, миттєвий доступ до даних та можливість інтеграції з державними реєстрами. В якості недоліків

слід зазначити високу вартість встановлення та необхідність регулярного техобслуговування.

Індикативні методи та лабораторний пробовідбір полягає у періодичному відборі повітря з атмосфери або з димових труб для подальшого аналізу в лабораторних умовах [6]. Часто застосовується як контрольний або допоміжний метод до автоматизованих систем. Основні методи аналізу, які використовуються, це газова хроматографія, інфрачервона (ІЧ) спектроскопія та абсорбційні методи. Для прикладу, у проєктах моніторингу міського повітря в Києві Національний університет біоресурсів використовує хроматографію для оцінки викидів CO<sub>2</sub> на транспортних розв'язках.

Перевагами цих методів є висока точність результатів та можливість комплексного аналізу. До недоліків можна віднести тривалість обробки та неможливість моніторингу в реальному часі.

Супутники спостереження за Землею використовують спектрометрію для вимірювання відбитого сонячного світла, поглинутого CO<sub>2</sub> в атмосфері [7]. Вони здатні створювати карти розподілу концентрацій викидів у глобальному масштабі. Види супутників, які можуть використовуватись: OCO-2 (NASA) – спостерігає за щільністю CO<sub>2</sub> з точністю до кількох частин на мільйон; Sentinel-5P (ESA) – моніторинг якості повітря, включно з CO<sub>2</sub> та метаном; GHGSat (Канада) – комерційні супутники з високою точністю для виявлення викидів з окремих об'єктів. У 2020 році GHGSat виявив несанкціоновані викиди CO<sub>2</sub> з промислового об'єкта в Китаї, які були підтверджені місцевими екологами.

Перевагами використання супутників є глобальне охоплення та незалежність від джерел викидів. До недоліків можна віднести обмеження у хмарну погоду та затримка між вимірюванням і доступом до даних.

Мобільні сенсори та дрони – портативні пристрої, які можуть кріпитися до транспортних засобів або дронів для вимірювання викидів безпосередньо над джерелами чи на певній висоті. Технології, які при цьому використовуються це лазерна спектроскопія (LIDAR), оптичні газоаналізатори та безконтактні сенсори. В Університеті штату Колорадо дослідники використовують дрони для

моніторингу CO<sub>2</sub> з ферм, які виробляють біогаз, і створюють 3D-карти забруднення. До переваг відносяться гнучкість застосування та висока мобільність. До недоліків можна віднести обмежений час польоту та залежність від погодних умов.

Розрахункові методи (інвентаризація) працюють на основі даних про споживання палива, технологічні процеси та активність галузей проводиться розрахунок викидів CO<sub>2</sub> за міжнародними або національними стандартами. Методики, які використовуються, це IPCC Guidelines, GHG Protocol та Український реєстр викидів і перенесення забруднювачів (PRTR). Наприклад, підприємство може щорічно подавати звіт за формою PRTR, де вказує обсяги спаленого газу та відповідно – розраховані викиди CO<sub>2</sub> [6]. До переваг можна віднести широке охоплення та стандартизацію даних. До недоліків – залежність від точності первинних даних та не виявляє несанкціонованих викидів.

Інтернет речей (IoT) та цифрові системи контролю дозволяє створити мережу з безлічі взаємопов'язаних сенсорів, які у реальному часі вимірюють CO<sub>2</sub> та інші параметри довкілля. Ці дані передаються в хмарні платформи для подальшого аналізу. Ці технології застосовуються в розумних містах, промислових об'єктах та для побутового моніторингу. Наприклад, місто Барселона, Іспанія впровадило мережу IoT-сенсорів, які моніторять CO<sub>2</sub> вулицями в реальному часі, інтегруючи дані у міську систему планування трафіку. Перевагами використання таких технологій є масштабованість та миттєвий зворотний зв'язок. До недоліків можна віднести потребу в кіберзахисті та технічну складність налаштування.

Тобто, використання методів та засобів відстежування і аналізу викидів вуглецю у атмосферу залежить від сфери застосування.

Тому, необхідно зосередитись на виборі галузі та дослідити її в роботі більш детально.

### 1.3 Дослідження впливу автомобільного транспорту на зміну клімату та забруднення атмосфери

Зростаюча залежність від автомобільного транспорту призвела до збільшення викидів парникових газів, особливо вуглецю CO<sub>2</sub>, які негативно впливають на навколишнє середовище та, у свою чергу, сприяють глобальному потеплінню та зміні клімату. Згорання бензину в двигуні утворює CO<sub>2</sub> та H<sub>2</sub>O, що сприяє руйнуванню озонового шару. Окрім спалювання викопного палива, ці транспортні засоби викидають у повітря забруднюючі речовини, які шкодять навколишньому середовищу. Якість повітря визначається типом використовуваної транспортної системи [7]. Використання автотранспорту є основним джерелом CO<sub>2</sub> викидів в атмосферу. Очікується, що викиди зростуть на 305% до 2050 року, якщо не будуть вжиті істотні кроки для вирішення цієї проблеми [8].

Згідно звітів порталу Statista [9], де було випадковим чином вибрано 20 країн для дослідження викидів CO<sub>2</sub> від транспорту, було виявлено, що найбільшими забруднювачами в світі є Саудівська Аравія, Сполучені Штати Америки, Канада, Австралія, Південна Корея, Японія та Німеччина (рисунок 1.2). Ці країни виробляють найбільшу кількість CO<sub>2</sub>, оскільки вони є високорозвиненими країнами з найбільшим використанням автотранспорту.

Зростання викидів також пов'язане з урбанізацією та збільшенням кількості приватних транспортних засобів. У великих містах світу щоденне переміщення мільйонів автомобілів призводить до утворення густого смогу, що не лише погіршує якість повітря, а й становить загрозу для здоров'я населення. Часточки пилу, оксиди азоту, вуглекислий та чадний газ викликають хвороби дихальної системи, серцево-судинні захворювання та підвищують ризик онкологічних хвороб.

Дослідження викидів CO<sub>2</sub> виявили, що кількість викидів від транспортного сектору збільшуються, коли шкідливі забруднювачі, отримані від викопного

палива вступають в реакцію з хімічними речовинами під час процесу згоряння перед викидом в атмосферу.

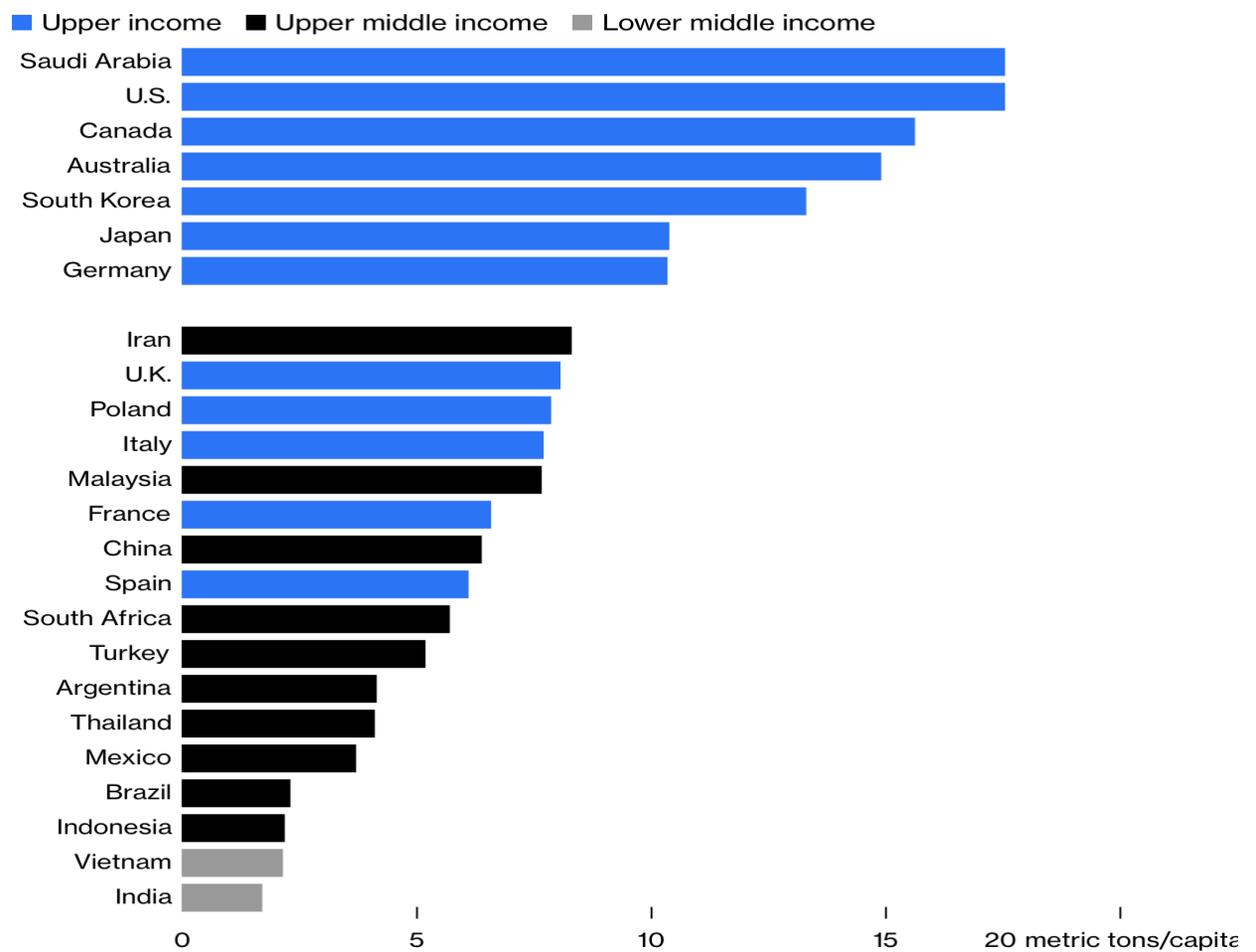


Рисунок 1.2 – Викиди CO<sub>2</sub>: список країн – найбільших забруднювачів [10]

Кількість CO<sub>2</sub> викидів залежить від стану транспортного засобу та типу використовуваного викопного палива. Вантажівки викидають найбільшу кількість CO<sub>2</sub> в порівнянні з фургонами. Також, викиди CO<sub>2</sub> дизельних автомобілів нижче, ніж бензинових, але 1 літр дизельного палива виробляє 2,7 кг CO<sub>2</sub>, в той час, як 1 літр бензинового палива виробляє лише 2,4 кг. На основі цього можна зробити висновок, що більший об'єм двигуна транспортного засобу призводить до більшого споживання палива та викидів CO<sub>2</sub>. Витрата палива транспортних засобів зростає з кожними 100 кг збільшення їх маси. Це призводить до збільшення CO<sub>2</sub> на 6,5% та 7,1 % викидів бензинових та дизельних транспортних засобів відповідно.

Країни, що активно працюють над зниженням рівня викидів, впроваджують нові екологічні стандарти, розвивають громадський транспорт та стимулюють перехід до електромобілів. Наприклад, у Норвегії понад половина нових автомобілів, зареєстрованих у 2023 році, були електричними, що значно знизило рівень CO<sub>2</sub> у повітрі. Однак у більшості країн світу такі ініціативи лише починають набирати обертів і потребують значних фінансових інвестицій, політичної волі та підтримки з боку населення.

Таким чином, проблема зростання викидів CO<sub>2</sub> від автотранспорту залишається актуальною та потребує комплексного вирішення на глобальному рівні. Без належного регулювання ситуація продовжуватиме погіршуватися, що матиме довгострокові наслідки для навколишнього середовища та здоров'я людей. Як видно з рисунку 1.2 України немає в переліку країн найбільших забруднювачів, оскільки викиди України зменшувались кожен рік (рисунок 1.3).

Але, наразі, в зв'язку з війною ситуація кардинально погіршилась (рисунок 1.4), про що свідчать дані досліджень [11].

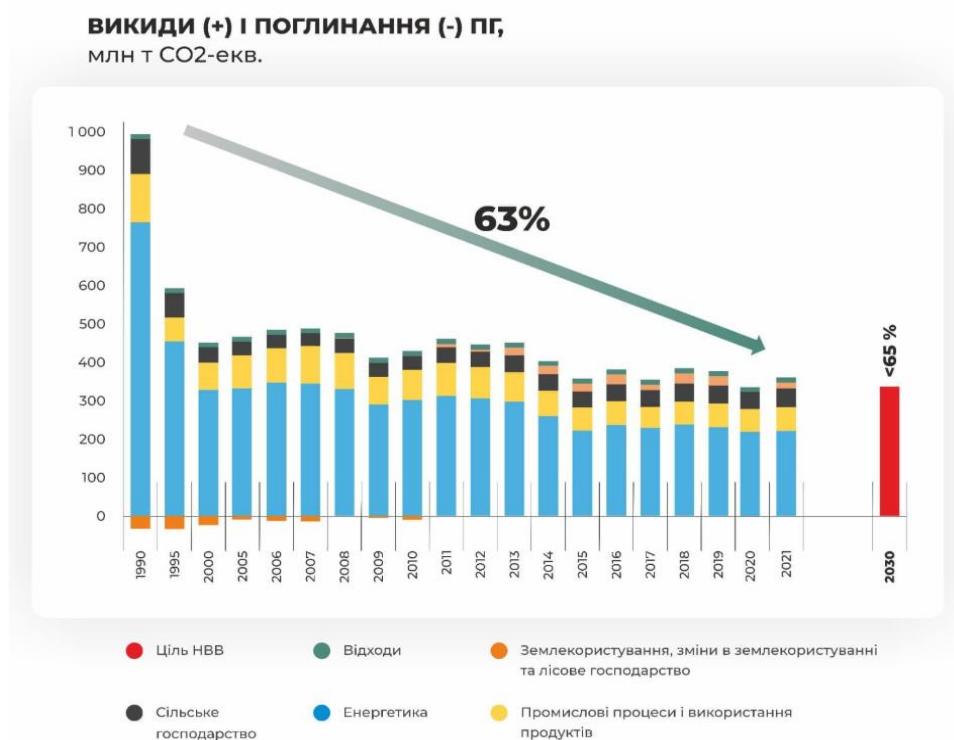


Рисунок 1.3 – Кількість викидів парникових газів в Україні упродовж 30 років [11]

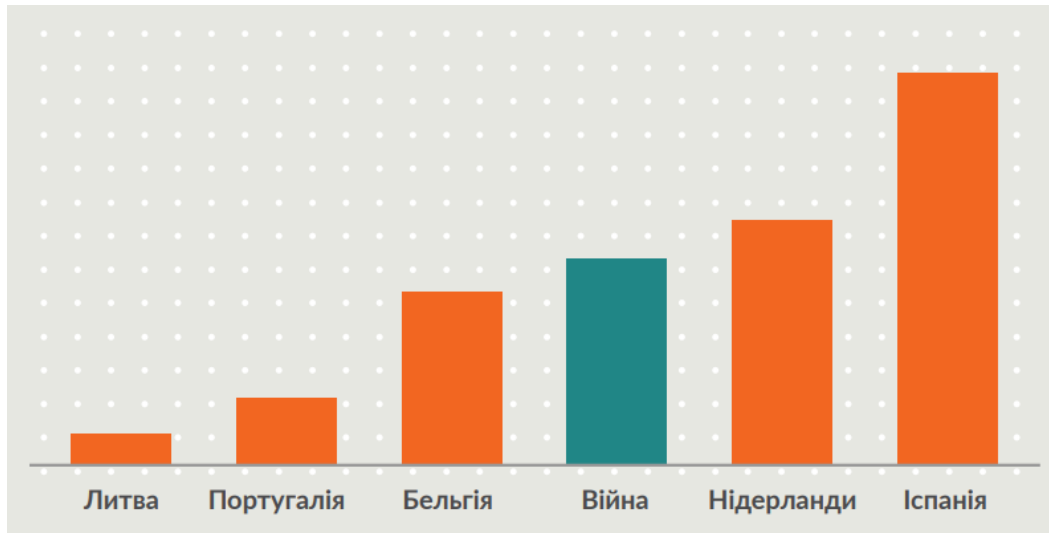


Рисунок 1.4 – Викиди парникових газів внаслідок війни у порівнянні з річними викидами деяких європейських країн [12]

Війна в Україні завдала шкоди природному середовищу, а також спричинила значне збільшення викидів парникових газів, в тому числі вуглецю CO<sub>2</sub> в атмосферу (рисунок 1.5).

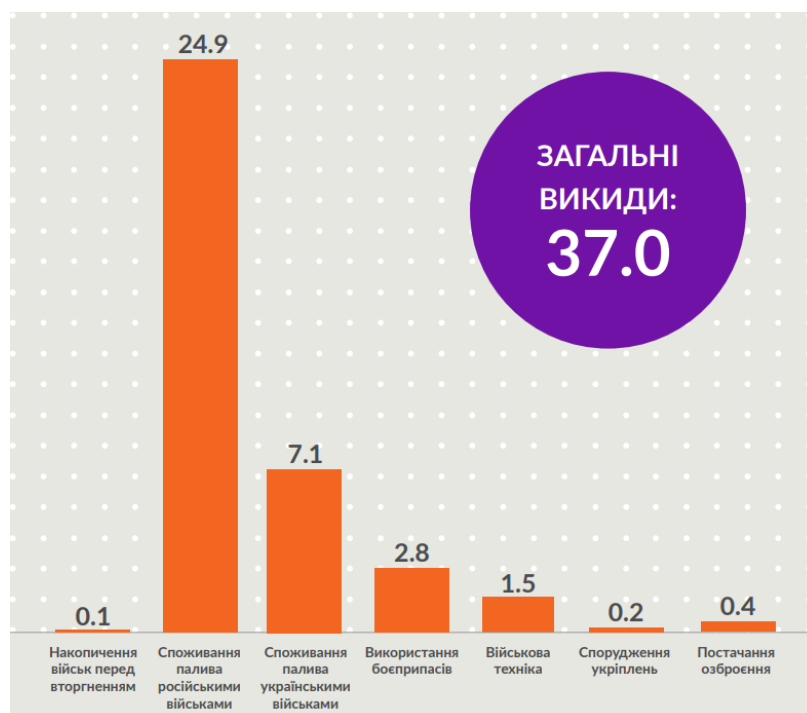


Рисунок 1.5 – Викиди від бойових дій (млн. тонн CO<sub>2</sub> екв.) [12]

Військові дії на території України ускладнюють досягнення поставлених цілей Паризької кліматичної угоди [12].

Оскільки, наразі з об'єктивних причин вплинути на зменшення викидів вуглецю CO<sub>2</sub> внаслідок проведення бойових дій на території України неможливо, варто зосередитись на відстежуванні та аналізі викидів вуглецю CO<sub>2</sub> у атмосферу на прикладі регіонів, де не проводяться активні бойові дії, наприклад м. Хмельницький.

У Хмельницькому відсутні великі промислові підприємства, які могли б істотно впливати на загальний рівень викидів вуглецю CO<sub>2</sub>. Це надає можливість сконцентрувати увагу саме на транспортному факторі, як головному джерелі забруднення повітря в межах міста. З початку повномасштабної війни кількість автомобілів у місті зросла, що пов'язано як з внутрішньою міграцією населення, так і з активним завезенням вживаних автомобілів з країн Європи.

Значна частина цих авто – технічно застарілі моделі, які мають нижчі екологічні стандарти (наприклад, відповідають нормам «Євро-3» або навіть нижчим). Через їхній вік, такі транспортні засоби споживають більше пального і, відповідно, викидають у повітря більше вуглецю, а також інших шкідливих речовин: оксидів азоту, чадного газу, часточок сажі. У години пік центральна частина Хмельницького та деякі житлові райони стають зонами транспортного скупчення. Часте простоювання автомобілів у заторах, спричиняє додаткові викиди без реального переміщення транспорту, що значно погіршує якість повітря.

Також слід звернути увагу на відсутність ефективної системи громадського транспорту, яка б могла зменшити залежність містян від приватного автотранспорту. Низький рівень розвитку велосипедної інфраструктури та обмеженість пішохідних зон не стимулюють населення до альтернативних способів пересування. Це своєю чергою підвищує транспортне навантаження та погіршує екологічну ситуацію.

У зв'язку з цим, постає необхідність впровадження різних засобів моніторингу, зокрема кіберфізичних систем, з метою оцінки рівня викидів CO<sub>2</sub> у

атмосферу та аналізу їх динаміки. Такі дослідження дозволять виявити найпроблемніші зони, оптимізувати транспортні потоки та розробити стратегії локального зниження викидів. Наприклад, доцільним було б облаштування екологічних зон у центрі міста, обмеження руху транспорту у певні години, впровадження електробусів та підтримка громадян у переході на більш екологічні види транспорту.

Паралельно з цим необхідна інформаційна кампанія для підвищення екологічної свідомості населення. Більшість водіїв не усвідомлює, що навіть технічне обслуговування автомобіля (заміна фільтрів, контроль викидів, використання якісного пального) може істотно зменшити рівень шкідливих викидів.

Таким чином, Хмельницький є прикладом міста, де немає масштабних промислових забруднювачів, однак проблема зростаючого впливу транспорту на якість повітря є досить серйозною. Саме тому доцільно реалізовувати пілотні програми щодо зменшення CO<sub>2</sub>-викидів, на основі використання кіберфізичних систем відстежування та аналізу викидів вуглецю у атмосферу, впровадження «зеленого» транспорту та підвищення екологічної грамотності населення. Подібні заходи можуть стати зразком для інших регіонів України.

#### 1.4 Постановка задачі

Сучасні глобальні екологічні виклики, зокрема зміна клімату, спричинена зростанням концентрації парникових газів, зумовлюють необхідність створення ефективних інструментів для моніторингу та аналізу викидів вуглецю CO<sub>2</sub> в атмосферу. Одним з основних джерел цих викидів є транспортний сектор, частка якого продовжує збільшуватись, особливо в урбанізованих регіонах з обмеженою екологічною інфраструктурою.

Актуальність дослідження зумовлена тим, що в умовах воєнного стану в Україні неможливо реалізувати національні заходи із суттєвого скорочення викидів вуглецю, тому доцільно зосередити зусилля на аналізі ситуації у відносно

стабільних регіонах, зокрема у місті Хмельницький. В цьому місті відсутні великі промислові підприємства, однак спостерігається значне збільшення кількості автотранспорту, включаючи застарілі автомобілі з високим рівнем шкідливих викидів.

У зв'язку з цим виникає потреба у розробці методу та кіберфізичної системи, яка забезпечить:

1. Автоматизоване відстеження рівня викидів CO<sub>2</sub> у міських умовах з урахуванням транспортних потоків, часу доби та географічного розподілу.
2. Збір, обробку та зберігання екологічних даних у режимі реального часу для подальшого аналізу.
3. Можливість прогнозування динаміки викидів та оцінки ефективності екологічних заходів.
4. Створення візуалізацій та аналітичних звітів, що дозволить органам місцевого самоврядування приймати обґрунтовані управлінські рішення.
5. Інтеграцію з мобільними додатками або веб-інтерфейсом, доступним для користувачів та дослідників.

Метою цієї роботи є забезпечення моніторингу в режимі реального часу викидів вуглецю (CO<sub>2</sub>) в атмосферу за рахунок методу та кіберфізичної системи відстежування і аналізу викидів вуглецю у атмосферу з фокусом на транспортний сектор у середніх містах України, що сприятиме зменшенню шкідливого впливу на навколишнє середовище.

Отже, для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

1. Провести аналіз відомих методів та рішень моніторингу викидів CO<sub>2</sub> та виявити їхні переваги і недоліки.
2. Змодельовати процес відстежування і аналізу викидів вуглецю CO<sub>2</sub> у атмосферу.
3. Сформуванати архітектуру кіберфізичної системи для відстеження викидів.

4. Розробити метод відстежування і аналізу викидів вуглецю CO<sub>2</sub> у атмосферу.
5. Розробити архітектури кіберфізичної системи відстежування і аналізу викидів вуглецю CO<sub>2</sub> у атмосферу.
6. Оцінити ефективність розробленої системи та визначити напрями її подальшого удосконалення.

### 1.5 Висновки до першого розділу

Викиди вуглецю (CO<sub>2</sub>) є ключовим чинником глобального потепління та зміни клімату. Основним джерелом цих викидів є спалювання викопного палива для виробництва енергії, транспорту, промисловості та побутових потреб. Накопичення CO<sub>2</sub> в атмосфері порушує природний баланс парникових газів, спричиняючи підвищення середньої температури на планеті, танення льодовиків, підняття рівня світового океану та зростання частоти екстремальних погодних явищ. Відстеження, аналіз і прозоре управління викидами – необхідна умова для досягнення кліматичних цілей, визначених Паризькою угодою.

У результаті проведеного дослідження встановлено, що транспортний сектор є одним з основних джерел викидів вуглецю (CO<sub>2</sub>) в атмосферу, особливо в умовах середніх урбанізованих міст, таких як Хмельницький. Аналіз впливу різних типів транспортних засобів, їх технічного стану та виду пального засвідчив, що великовагові та застарілі автомобілі генерують найбільшу кількість викидів. Розроблення кіберфізичної системи, яка забезпечує: автоматизоване відстеження викидів CO<sub>2</sub> у режимі реального часу, географічну локалізацію джерел забруднення, прогнозування динаміки викидів та інтерфейс візуалізації даних для прийняття управлінських рішень є актуальною задачею.

Реалізація такої системи дозволить не лише проводити ефективний моніторинг, а й створити підґрунтя для впровадження екологічних заходів, зокрема оптимізації транспортних потоків, розвитку електротранспорту та популяризації екологічної поведінки серед населення.

## **2 МОДЕЛЬ ПРОЦЕСУ ВІДСТЕЖУВАННЯ І АНАЛІЗУ ВИКИДІВ ВУГЛЕЦЮ CO<sub>2</sub> У АТМОСФЕРУ**

### **2.1 Процес відстежування викидів вуглецю CO<sub>2</sub> у атмосферу**

Моделювання процесу моніторингу та відстежування викидів CO<sub>2</sub> також є важливим інструментом для прогнозування майбутніх змін, що дозволяє приймати своєчасні та ефективні рішення щодо зниження викидів і адаптації до зміни клімату. Точні моделі можуть підтримувати розробку нових екологічних стандартів, сприяючи розвитку сталого транспорту. Врахування викидів CO<sub>2</sub> в процесах планування та прийняття рішень дозволяє зберегти навколишнє середовище для майбутніх поколінь. Крім того, точні прогнози щодо викидів допомагають сприяти розвитку технологій та інфраструктури для зменшення забруднення та переходу до більш стійких форм транспортних засобів (ТЗ).

Моделювання процесу відстежування викидів CO<sub>2</sub> від автомобільного транспорту є важливим інструментом для наступних процесів:

1. Оцінки впливу транспорту на навколишнє середовище, оскільки це дозволяє зрозуміти, наскільки транспорт є джерелом забруднення в конкретному регіоні чи місті.

2. Планування заходів щодо зменшення викидів. Точні моделі допомагають розробляти стратегії для зменшення забруднення, наприклад, через впровадження електричних транспортних засобів, поліпшення інфраструктури для громадського транспорту або сприяння розвитку альтернативних видів транспорту.

3. Аналіз ефективності політик та ініціатив, при цьому моделювання дає можливість оцінити результативність вже впроваджених заходів, таких як запровадження екологічних стандартів для автомобілів, збільшення кількості зелених зон у містах тощо.

4. Моніторинг змін у динаміці викидів. Завдяки постійному аналізу можна відстежувати зміни у транспортній ситуації, що дозволяє оперативно реагувати на зміни у навантаженні на транспортну інфраструктуру.

Існує кілька основних підходів до моделювання відстежування викидів CO<sub>2</sub> від автомобільного транспорту. Вибір конкретного методу залежить від доступних даних, цілей аналізу та ресурсів.

У таблиці 2.1 представлені основні підходи до моделювання викидів CO<sub>2</sub>, їх характеристики та приклади застосування.

Таблиця 2.1 – Підходи до моделювання відстежування викидів CO<sub>2</sub>

№	Підхід до моделювання	Точність/ Складність	Необхідні дані	Переваги / Недоліки
1	Емпіричний (статистичний) Обчислення за допомогою емісійних факторів (EF)	Низька/ Дуже низька	Кількість авто, пробіг, EF	+ Простий, швидкий аналіз – Неточний у міських умовах
2	Bottom-up (дисагреговані) Моделювання для кожного типу ТЗ з урахуванням технологій, пробігу, швидкості	Вище середньої/ Середня	Типи авто, маршрути, швидкість	+ Висока точність – Потребує багато даних
3	Транспортне моделювання Імітація руху транспорту на дорогах з розрахунком викидів у реальному часі	Вище середньої/ Вище середньої	Дані трафіку, карта міста, GIS	+ Враховує поведінку руху – Складне та ресурсомістке
4	Супутникові + AI/ML Аналіз концентрації забруднень з космосу за допомогою ML	Низька / Вище середньої	Супутникові знімки, алгоритми шт. інтелекту	+ Масштабно, новітній підхід – Низька точність для окремих вулиць
5	Гібридні підходи Комбінація кількох моделей: емісійні + трафік + супутники	Вище середньої Середня	Різномірні джерела	+ Баланс точності та складності – Потребує інтеграції різних систем

Аналізуючи існуючі підходи до моделювання, слід зазначити, що всі вони ще й відрізняються сферою застосування. Наприклад, емпіричний підхід використовують для базової аналітики. Bottom-up (дисагреговані) методи використовують для розроблення екологічної політики та екомоніторингу в містах. Транспортне моделювання необхідно застосовувати для проектування розумних міст та міського планування. Супутникові + AI/ML методи використовуються для глобального моніторингу та глобальних досліджень. Гібридні підходи, де застосовується комбінація кількох моделей необхідні для комплексного аналізу та проектування адаптивних систем.

Структурна схема процесу відстежування викидів CO<sub>2</sub> у атмосферу від транспорту представлена на рисунку 2.1.

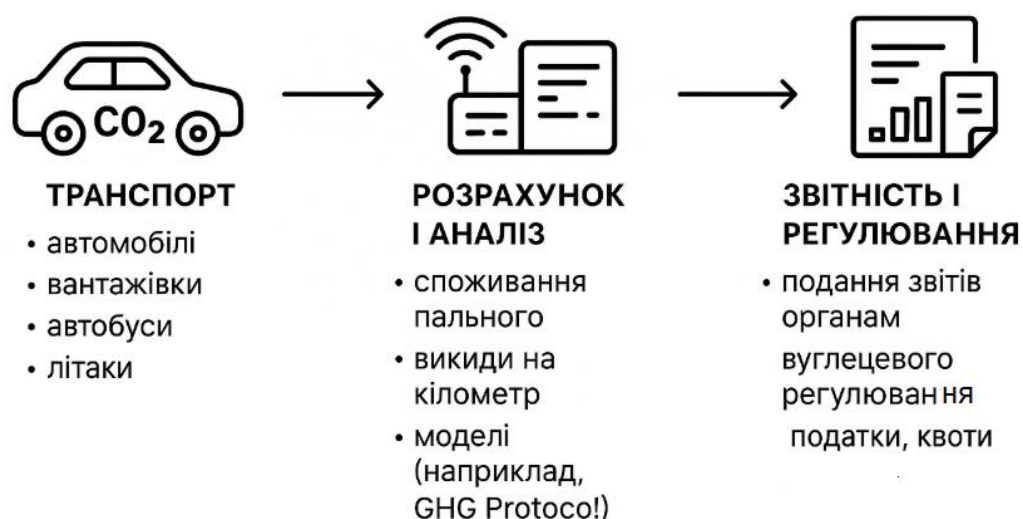


Рисунок 2.1 – Структурна схема процесу відстежування викидів CO<sub>2</sub> у атмосферу від транспорту

Моделювання транспортних викидів CO<sub>2</sub> може здійснюватися на різних масштабних рівнях – від детального мікроскопічного аналізу до глобальних стратегічних оцінок [14]. На мікрорівні застосовуються мікромоделювання, моделі поведінки та агентні підходи, які дозволяють змоделювати транспортні мережі з високим рівнем деталізації. Такі моделі імітують поведінку окремих

транспортних засобів або навіть людей, що приймають рішення про пересування, дозволяючи аналізувати складні взаємозв'язки між індивідуальними рішеннями та глобальними мобільнісними шаблонами. Зокрема, мікросимуляції дають змогу фіксувати конкретні викиди від кожного транспортного засобу, однак вони не враховують глибинну мотивацію дій користувачів, тоді як агентно-орієнтовані моделі здатні охоплювати ці поведінкові аспекти. Розрахунок викидів CO<sub>2</sub> у цих моделях залежить від контексту застосування. Наприклад, при використанні симуляційних платформ на кшталт VISSIM у поєднанні з модулями EnViVer Pro можна досягти високої точності, враховуючи профілі швидкості, час зупинок та інші фактори, які впливають на інтенсивність викидів [15]. Однак підвищення рівня деталізації супроводжується зростанням потреби в даних та обчислювальних ресурсах, тому для вирішення окремих питань часто доцільно застосовувати агреговані підходи з меншою дезагрегацією, які забезпечують високорівневу оцінку сукупних викидів.

На противагу мікропідходам, техніко-економічні моделі та інтегровані моделі оцінки (IAM) орієнтовані на аналіз впливу транспорту в межах регіональних або глобальних економічних систем [16]. Вони дозволяють оцінити ефективність політик викидів на національному або міжнародному рівнях, визначити довгострокові наслідки та підтримати стратегічне планування в умовах кліматичних викликів. Водночас транспортні моделі на кшталт EU TransTools поєднують високу просторову деталізацію з масштабним охопленням, моделюючи подорожі у межах великих територій, наприклад, усієї Європи.

Між мікросимуляцією та макромодельованням розташовуються системно-динамічні підходи, що займають проміжну позицію. Наприклад, модель MARS фокусується на динаміці транспортної системи мегаполісу, тоді як ASTRA охоплює широку європейську транспортну мережу [17]. Ці моделі дозволяють виявляти та досліджувати причинно-наслідкові зв'язки, взаємодію між транспортом і землекористуванням, розвитком ринку альтернативних транспортних засобів. Однією з особливостей є можливість візуалізувати певні

сценарії за допомогою діаграм зворотного зв'язку (CLD), що дозволяє бачити динаміку участі різних стейкхолдерів та можливі наслідки рішень.

Очевидно, що незалежно від просторового чи часового масштабу завдання, існують моделі, які здатні надати глибоке розуміння впливу транспорту на клімат. При цьому все частіше в дослідницьких і прикладних проєктах використовуються комбіновані або гібридні підходи, які поєднують переваги різних типів моделей, підвищуючи точність оцінок і релевантність рекомендацій для прийняття рішень.

## 2.2 Процес аналізу викидів вуглецю CO<sub>2</sub> у атмосферу

Процес аналізу викидів включає збір та обробку великого обсягу даних: від кількості транспортних засобів і типу пального до особливостей маршруту, швидкості руху та часу простою. Також важливим є врахування просторових і часових факторів, оскільки рівень забруднення може значно змінюватися в залежності від локації, погодних умов або часу доби.

Залежно від цілей дослідження, для оцінки викидів застосовують різні моделі, наприклад, від простих калькуляторів емісій до складних симуляцій на основі поведінки учасників руху чи макроекономічних сценаріїв. Такий аналіз дозволяє не лише виявити «гарячі точки» забруднення, а й оцінити ефективність різних політичних і технічних рішень, спрямованих на зменшення впливу транспорту на клімат. Розглянемо найбільш використовувані підходи до моделювання аналізу викидів вуглецю.

Мікросимуляція надає високий рівень деталізації, оскільки він аналізує викиди від кожного окремого транспортного засобу в реальному часі [17]. Завдяки таким моделям можна оцінити точні значення викидів, враховуючи швидкість руху, стиль водіння, час зупинок та інші фактори. Це дозволяє отримати дуже точні дані для певних ситуацій, наприклад, для планування міської інфраструктури або для тестування змін у дорожньому русі. Однак, такі моделі вимагають значних обчислювальних ресурсів та можуть бути обмежені в аналізі поведінкових факторів водіїв.

При агентно-орієнтованому моделюванні моделі цього типу орієнтовані на поведінку індивідуумів [18]. Вони дозволяють змодельовати, як люди приймають рішення щодо вибору маршрутів, видів транспорту, швидкості руху і т. д. Ці моделі є корисними для дослідження того, як зміни в транспортній політиці (наприклад, нові тарифи або заборони на в'їзд в центр міста) можуть вплинути на поведінку людей і, відповідно, на викиди. Водночас, цей підхід потребує великих обсягів даних і може бути дуже складним для реалізації.

Моделі поведінки зосереджуються на мотиваціях і рішеннях людей, що визначають їх мобільність [19]. Вони можуть враховувати такі фактори, як бажання зекономити час, кошти або зменшити вплив на навколишнє середовище. Ці моделі допомагають краще зрозуміти, чому люди обирають ті чи інші маршрути чи види транспорту, що дає можливість оцінити, як зміни в поведінці впливають на викиди CO<sub>2</sub>. Однак, вони часто не відображають повною мірою транспортну динаміку (наприклад, затори чи аварії).

Моделі системної динаміки враховують взаємодію різних елементів системи, таких як транспорт, землекористування та економіка. Вони дають змогу зрозуміти довгострокові наслідки різних політик та змін в транспортній інфраструктурі. Наприклад, модель може показати, як збільшення кількості електричних автомобілів змінить рівень викидів у місті за кілька років. Цей підхід є дуже потужним для стратегічного планування, але при цьому може спрощувати деякі аспекти поведінки транспортної системи.

Техніко-економічні моделі (IAM) розглядають викиди CO<sub>2</sub> як частину більш широкої економічної чи енергетичної системи, аналізуючи вплив транспорту на глобальні та регіональні економічні процеси. Вони дозволяють прогнозувати вплив великих інфраструктурних проєктів або змін у політиці на всю економіку. Такі моделі особливо корисні на макрорівні (наприклад, на рівні країн чи континентів), але не дають точних даних щодо транспортної поведінки чи індивідуальних викидів.

Моделі транспортних мереж оцінюють рух транспортних засобів в межах більшого простору, наприклад, в межах міста або міжміських шляхів. Вони

допомагають аналізувати, як зміни в дорожній мережі (нові дороги, мости, тунелі тощо) впливають на інтенсивність руху і, відповідно, на викиди CO<sub>2</sub>. Ці моделі є дуже важливими для планування транспортної інфраструктури, але часто не враховують індивідуальних факторів, таких як вибір маршрутів водія.

Спрощені емісійні моделі або калькулятори дають загальні оцінки викидів CO<sub>2</sub> на основі коефіцієнтів (наприклад, для різних типів пального чи транспортних засобів) та простих даних (наприклад, кількості кілометрів, що проїхав транспорт). Вони є дуже корисними для швидких оцінок, проте через свою простоту не дають точних результатів для конкретних ситуацій чи змін у поведінці водіїв.

Основні типи моделей, які використовуються для оцінки викидів CO<sub>2</sub> в атмосферу (зокрема в транспортному секторі) наведені в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Типи моделей, які використовуються для оцінки викидів CO<sub>2</sub>

Тип моделі	Рівень деталізації	Що моделює	Приклади інструментів	Переваги	Обмеження
Мікросимуляція	Високий (окремі ТЗ)	Рух та викиди окремих транспортних засобів у реальному часі	VISSIM + EnViVer, AIMSUN	Точні дані, врахування стилю водіння, швидкості, часу зупинок	Високі обчислювальні потреби, не враховує поведінкові мотиви
Агентно-орієнтоване моделювання	Високий (індивіди)	Поведінка людей, прийняття рішень, вибір маршрутів/ видів транспорту	MATSim, SUMO (з агентами)	Моделює реалістичну поведінку, вплив політик на мобільність	Складність, потреба у великих обсягах вхідних даних

Кінець таблиці 2.2

Тип моделі	Рівень деталізації	Що моделює	Приклади інструментів	Переваги	Обмеження
Моделі поведінки	Середній	Мотивації та рішення користувачів щодо переміщень	ALBATROSS, FATE	Деталізація поведінкових причин переміщень	Не завжди точно відтворює транспортну динаміку
Системна динаміка	Середній - високий (регіони)	Взаємодія між транспортом, економікою, землекористуванням	MARS, ASTRA, Vensim	Враховує зворотні зв'язки, прогнозує наслідки політик	Менш точна просторово, спрощує транспортну поведінку
Техніко-економічні моделі (IAM)	Низький – середній (макро)	Викиди транспорту у загальному контексті економіки та енергетики	MARKAL, MESSAGE, GCAM	Глобальні сценарії, стратегічне планування	Не детальні щодо транспорту, усереднені розрахунки
Моделі транспортних мереж	Середній – високий	Переміщення пасажирів та вантажів між регіонами, інтенсивність руху	EU TransTools, VISUM	Просторовий аналіз на рівні міста/регіону моделює потоки руху	Не враховує індивідуальну поведінку
Спрощені емісійні калькулятори	Низький	Орієнтовні розрахунки за загальними коефіцієнтами (тип палива, пробіг)	COPERT, HBEFA, калькулятори CO2 онлайн	Легкість використання базові оцінки	-

У реальних проектах часто поєднують кілька типів моделей, наприклад, мікросимуляцію з поведінковими моделями або системну динаміку з транспортними мережами.

Процес аналізу викидів вуглецю CO<sub>2</sub> у атмосферу покажимо у вигляді схеми (рисунок 2.2).

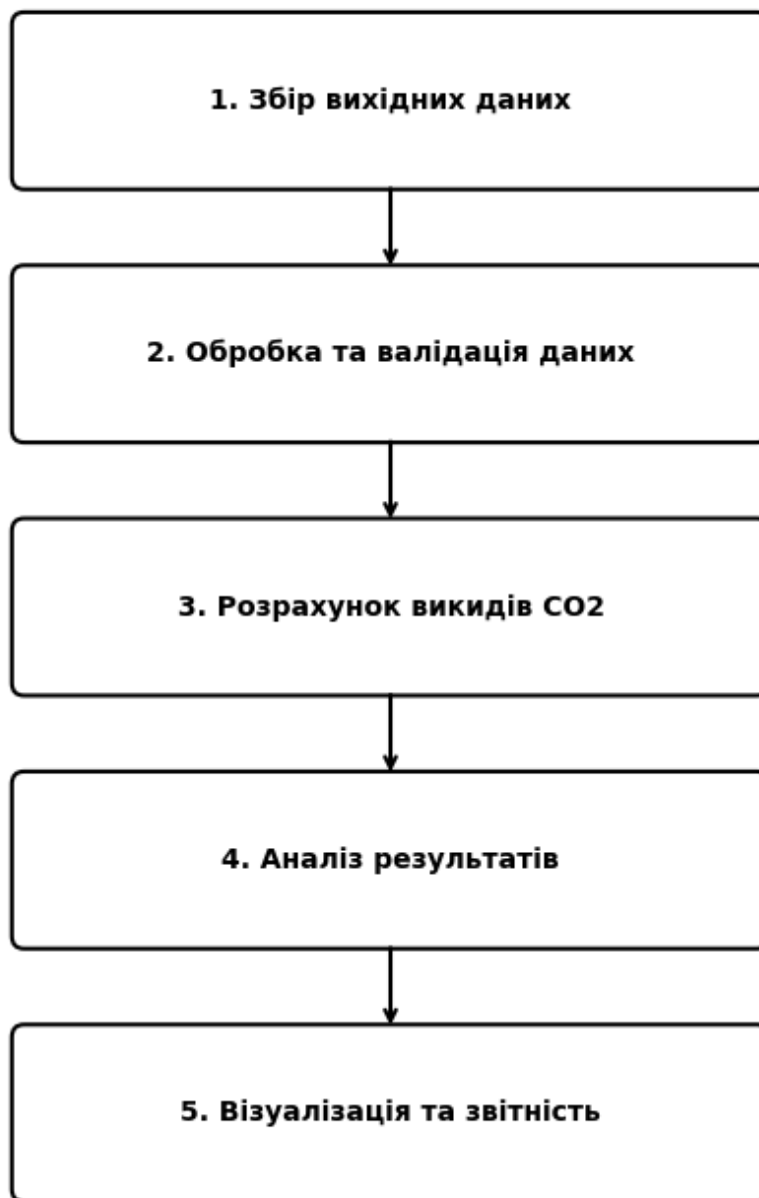


Рисунок 2.2 – Процес аналізу викидів вуглецю CO<sub>2</sub> у атмосферу

Процес аналізу викидів CO<sub>2</sub> складається з п'яти етапів. Опишемо більш детально кожен етап.

Етап збору вихідних даних включає збір інформації з різних джерел, наприклад:

- пальне (кількість спожитого пального, його тип);
- транспортні дані (маршрути, пробіг, час роботи);
- промислові установки (тип палива, обсяги виробництва);
- енергоспоживання;
- дані з датчиків CO<sub>2</sub> (при прямому моніторингу);
- супутникові або погодні дані (опціонально).

На етапі обробки та валідації даних відбувається сортування даних, їх аналіз, перевірка, тощо. Якісне виконання цього етапу безпосередньо впливає на якість всього процесу аналізу, тому що тут відбувається наступні дії:

- видалення «сміттєвих» даних або аномалій;
- узгодження форматів;
- перевірка достовірності та повноти інформації;
- синхронізація по часу та місцю.

Розрахунок викидів CO<sub>2</sub> відбувається з використанням емісійних факторів (kg CO<sub>2</sub> / л пального або на кВт·год тощо). Також можуть використовуватись формули типу, як: Викиди CO<sub>2</sub> = Кількість пального × Емісійний фактор.

Для автомобільного транспорту рекомендовано враховувати такі фактори:

- тип пального (бензин, дизель, електро);
- маса транспортного засобу;
- швидкість та умови руху.

На етапі аналізу результатів необхідно проаналізувати наступні моменти:

- визначити основні джерела викидів;
- провести порівняння з нормативами або попередніми періодами;
- виявити тенденції (наприклад, зростання викидів у години пік);
- виконати географічний аналіз (викиди по районах або маршрутах).

Етап візуалізації та звітності допомагає візуалізувати отримані дані та сформувати звіти. Візуалізація може бути як у вигляді графіків, діаграм, теплових карт. Звітність також залежить від мети аналізу, наприклад формування

екологічних звітів або публічні дашборди для громадськості або внутрішні звіти для управлінців.

Після проведення такого процесу можна формулювати певні рекомендації та дії. Наприклад, це можуть бути:

- розробка політик скорочення викидів;
- оптимізація маршрутів, модернізація обладнання;
- перехід на екологічно чисте паливо;
- залучення громадськості до ініціатив зі зниження вуглецевого сліду.

### 2.3 Модель процесу відстежування і аналізу викидів вуглецю CO<sub>2</sub> у атмосферу

Для ефективного управління екологічною ситуацією у містах необхідно створити модель, яка дозволить відслідковувати і аналізувати рівень викидів CO<sub>2</sub> в атмосферу. Така модель повинна враховувати різноманітні чинники, що впливають на рівень викидів, зокрема: щільність транспортного потоку, типи палива, технічний стан транспортних засобів, географічне розташування та погодні умови.

Така модель може розглядатися в двох варіантах, кожен з яких має свої особливості, а також свої переваги та недоліки. Розглянемо їх більш детально.

Перша, це система з датчиками на транспортних засобах (ТЗ). Принцип роботи такої системи полягає в тому, що на громадський або службовий транспорт (автобуси, комунальні авто, таксі) встановлюються спеціальні сенсори, які в режимі реального часу фіксують:

- рівень CO<sub>2</sub> у вихлопних газах;
- геолокацію (GPS);
- час, швидкість, напрям руху.

Після фіксації, ці дані надсилаються через GSM/Wi-Fi в єдину базу, де здійснюється:

- аналіз за маршрутами;

- побудова карт забруднення;
- виявлення «гарячих точок».

Перевагами є висока точність методу у реальних умовах руху транспорту, динамічний моніторинг повітря за різними заданими маршрутами, а також, можливість виявлення технічно несправних або екологічно небезпечних авто.

Другий варіант системи, це система без датчиків на транспортному засобі (стаціонарна і мобільна інфраструктура). Принцип роботи такої системи полягає в наявності або побудові мережі стаціонарних екосенсорів, встановлених на опорах, будівлях та у громадських місцях, а також мобільні платформи (дрони, машини з сенсорами), що проводять вимірювання в обраних точках. Дані об'єднуються в централізовану систему і використовуються для:

- створення загальної карти CO<sub>2</sub>;
- відстеження рівня забруднення в різних мікрорайонах;
- аналізу змін у часі.
- До переваг можна віднести:
- покриття великої площі без інтеграції з ТЗ;
- простота обслуговування;
- підходить для довготривалого спостереження.

В таблиці 2.3 наведена порівняльна характеристика цих двох систем.

Отже, розглянувши порівняльну характеристику двох підходів, можна зробити наступний висновок.

Якщо розглядати систему з датчиками на транспортних засобах, то вартість впровадження таких технологій є високою, оскільки це потребує індивідуального встановлення на кожен автомобіль, обладнання GPS, телеметрії, живлення, обслуговування.

Якщо без датчиків на транспортні засоби, то вартість впровадження може бути середня або низька, оскільки не має потреби у великій кількості сенсорів, а можна обійтись мінімумом сенсорів або мобільними платформами з багаторазовим використанням.

Таблиця 2.3 – Порівняльна таблиця двох підходів

Критерій	З датчиками на ТЗ	Без датчиків на ТЗ
Точність локалізації	Висока (в реальному русі)	Середня (залежить від кількості сенсорів)
Охоплення території	Обмежене маршрутами ТЗ	Може бути всеосяжне
Вартість впровадження	Висока (встановлення, обслуговування)	Середня/низька (особливо при стаціонарних)
Можливість розширення	Вимагає дообладнання ТЗ	Гнучке масштабування
Оперативність даних	В реальному часі	Може мати затримки
Критерій	З датчиками на ТЗ	Без датчиків на ТЗ
Вплив на політику транспорту	Значний (можна оптимізувати рух, техогляд)	Обмежений
Видимість маршрутних зон	Так, маршрути транспорту відображаються	Ні, потрібне окреме моделювання

Якщо розглядати такі системи з точки зору ефективності, то система з датчиками на транспортних засобах є більш ефективною, оскільки дає найточніші дані в реальних умовах, особливо по маршрутах. Система без датчиків на транспортних засобах має середню ефективність, є хорошою для загального аналізу, але менш точна в динаміці. Більшість європейських міст використовують комбінований підхід, оскільки така стратегія є більш оптимальною. Основу становить стаціонарна система, вона є дешевшою, а точкові мобільні вимірювання (на транспорті чи дронах) застосовуються в критичних зонах, на головних вулицях і маршрутах. Таким чином, можна досягти балансу між точністю та бюджетом.

Якщо говорити про ту систему, яку розглядаємо в даній роботі, то це система без датчиків на транспортних засобах. Не потрібно обладнувати кожне

авто, централізований контроль, також можна масштабувати на великі ділянки міста. Добре працює для аналізу заторів, зони з перевищенням викидів.

Обмеженнями такої системи є те, що неможливо точно знати витрату пального кожного авто. Тільки оціночні (модельні) розрахунки, а не пряме вимірювання CO<sub>2</sub>, також потрібна точна класифікація авто та калібрування моделей.

Розглянемо модель системи моніторингу викидів CO<sub>2</sub> у Хмельницькому (без датчиків на ТЗ). Схема роботи системи, адаптована під місто (рисунок 2.3).



Рисунок 2.3 – Структурна модель процесу відстежування і аналізу викидів вуглецю CO<sub>2</sub> у атмосферу

Розглянемо опис моделі більш детально:

1. Стационарні пункти моніторингу. Тут головними локаціями є головні перехрестя, мости, під'їзди до центру, наприклад:

- вул. Кам'янецька (біля Центрального ринку);
- Проспект Миру (район Озерної);
- вул. Західно-Окружна (транспортні вузли).

Обладнання, яке для цього необхідне, це відеокамери з AI-аналітикою та датчики руху або лічильники на дорогах.

2. Аналіз транспортного потоку (трафіку). Для аналізу транспортного потоку необхідно виконати наступні дії:

- розпізнавання типів ТЗ (легкові, вантажівки, маршрутні);
- визначення інтенсивності трафіку в різний час доби.

3. Погодні та геолокаційні дані. Використовуються дані з локальних метеостанцій та розрахунок дисперсії CO<sub>2</sub> залежно від вітру, температури.

4. Розрахунок викидів CO<sub>2</sub>. Можуть бути спеціальні методи або прості формули, наприклад, на основі середніх емісій: легкове авто = ~200 г CO<sub>2</sub>/км. Потрібно враховувати такі показники, як частки авто на холостому ході та середню швидкість та час заторів.

5. Міський аналітичний центр. Дані можуть бути представлені як централізована система моніторингу або дані виводяться у вигляді карт, таблиць, звітів, де може міститися наступна інформація:

- рівень викидів по районах;
- пікові години/дні;
- порівняння з допустимими нормами.

6. Прийняття рішень. Після отримання та аналізу інформації є можливість сформулювати рекомендації, які можуть містити наступну інформацію:

- оптимізація світлофорів у годинах пік;
- впровадження «зелених зон»;
- обмеження руху для вантажівок у центрі;
- розвиток велоінфраструктури.

На основі цього розглянемо приклад щоденного сценарію. Можливі інструменти, які будуть використовуватись, це камери з AI-аналітикою (як у SmartCity-системах), QGIS або ArcGIS для картографування, Power BI / Grafana для візуалізації.

Розглянемо часовий період 07:00 – 09:00 (ранкова година пік). Камери на вул. Кам'янецькій фіксують 250 авто/год. З усього транспорту 30% - старі дизельні авто. Далі система формує висновок – ймовірне перевищення рівня CO<sub>2</sub> на 22% у центрі. Рекомендація сформована системою – перенаправити трафік через вул. Свободи.

#### 2.4 Математична модель процесу відстежування та аналізу викидів CO<sub>2</sub>

Такий підхід дозволяє здійснювати моніторинг навколишнього середовища з високою точністю та забезпечує основу для прийняття екологічно доцільних рішень. У моделі враховуються ключові параметри транспортної системи, зокрема інтенсивність потоку транспорту та тип використаного палива. Також враховується географічне положення точки спостереження, що дає змогу адаптувати модель до конкретних умов місцевості. Динаміка концентрації CO<sub>2</sub> у повітрі визначається на основі обчислення питомих коефіцієнтів викидів і кількості спожитого пального. Часовий аспект дозволяє простежити зміни екологічної ситуації упродовж заданого періоду. Це сприяє оцінюванню впливу транспортної інфраструктури на якість повітря в міських умовах. Застосування такої моделі є корисним для екологічного планування, розробки заходів зі зменшення викидів та прогнозування можливих наслідків для здоров'я населення. Далі представлено формалізований опис цієї моделі (формула 2.1). Представимо модель за допомогою кортежу:

$$MV = \langle T, K, D, V, F, E, C \rangle, \quad (2.1)$$

де  $T$  – час спостереження,  $t \in [0, T]$ ;

$K$  – координати точки спостереження,  $K = (x, y \in R^2)$ ;

$D$  – концентрація CO<sub>2</sub> у точці  $(x, y)$  у момент часу  $t$ ,  $D(t, x, y, )$ ;

$V$  – інтенсивність транспортного потоку,  $V(t, x, y, )$ ;

$F$  – тип палива;

$E$  – питомий коефіцієнт викидів для палива;

$C$  – кількість спожитого палива.

Загальна модель описує динаміку концентрації вуглекислого газу в міському середовищі, враховуючи джерела викидів, просторово-часові зміни та розсіювання речовини в атмосфері. Формально модель складається з кількох основних компонентів:

1. Загальна кількість викидів. Загальні викиди CO<sub>2</sub> в певній точці простору та момент часу обчислюються як сума добутоків питомих коефіцієнтів викидів  $E$  на кількість спожитого пального  $C$  для кожного типу пального (2.2):

$$E(t, x, y) = \sum_i^0 E_i \times C_i(t, x, y), \quad (2.2)$$

де  $E$  – коефіцієнт викидів;

$C$  – кількість спожитого палива.

2. Рівняння переносу. Процес поширення CO<sub>2</sub> у повітрі описується диференціальним рівнянням переносу з урахуванням джерел, конвекції, дифузії та втрат:

$$\frac{\partial D}{\partial t} + v \times \nabla D = \alpha \Delta D + E(t, x, y) - \beta D, \quad (2.3)$$

де  $D(t, x, y, )$  – концентрація CO<sub>2</sub> у точці  $(x, y)$  у момент часу  $t$ ;

$v$  – вектор швидкості повітряного потоку;

$\alpha$  – коефіцієнт дифузії;

$\beta$  - коефіцієнт природного зменшення (абсорбції) CO<sub>2</sub>.

2. Дані з сенсорів. Дані, отримані від сенсорів у точках  $(x_k, y_k)$ , містять певну похибку спостереження (формула 2.4):

$$D_k(t) = D(t, x_k, y_k) + \varepsilon_k, \quad (2.4)$$

де  $\varepsilon_k$  - випадкова похибка вимірювання.

На жаль, у відкритих джерелах не вдалося знайти конкретних гранично допустимих концентрацій (ГДК) для викидів CO<sub>2</sub> в атмосферу, встановлених для міста Хмельницький. Загалом, CO<sub>2</sub> не вважається токсичним забруднювачем, тому для нього часто не встановлюються ГДК у нормативних документах.

Рекомендовані порогові значення концентрації CO<sub>2</sub> для м. Хмельницький [20]:

- низький: до 400 ppm;
- середній: 400–600 ppm;
- високий: понад 600 ppm.

Ці значення використовуються в багатьох країнах для оцінки якості повітря в приміщеннях та на відкритому повітрі. Для більш точного визначення порогових значень CO<sub>2</sub> в атмосфері Хмельницького рекомендується звернутися до місцевих екологічних служб або органів влади, які можуть надати актуальні дані та нормативи.

Наведемо правила для оцінювання рівня викидів вуглецю CO<sub>2</sub> у повітрі. Ці правила адаптовані для умов середньостатистичного міста без великої промисловості, такого як Хмельницький.

1. ЯКЩО транспортний потік високий, ТО рівень CO<sub>2</sub> зростає.
2. ЯКЩО кількість вантажних авто > легкових, ТО очікувані викиди CO<sub>2</sub> високі.
3. ЯКЩО тип палива = дизель, ТО питомий викид = 2.7 кг/л.
4. ЯКЩО тип палива = бензин, ТО питомий викид = 2.4 кг/л.
5. ЯКЩО двигун об'ємом > 2.0 л, ТО викиди підвищуються.
6. ЯКЩО вік автомобіля > 10 років, ТО збільшується ризик високих викидів.
7. ЯКЩО авто відповідає нормі < Євро-4, ТО екологічна загроза підвищується.

8. ЯКЩО маса авто збільшується на 100 кг, ТО викиди зростають на 6–7%.
9. ЯКЩО авто стоїть у заторі, ТО CO<sub>2</sub> продукується без ефективного руху.
10. ЯКЩО виявлено затор у центрі міста, ТО ймовірний пік CO<sub>2</sub>.
11. ЯКЩО вітер слабкий ТА викиди високі, ТО забруднення акумулюється.
12. ЯКЩО рівень CO<sub>2</sub> > допустимого значення, ТО система фіксує тривогу.
13. ЯКЩО CO<sub>2</sub> в районі стабільно високий > 3 днів, ТО рекомендувати обмеження руху.
14. ЯКЩО зафіксовано високий рівень CO<sub>2</sub>, ТО зберегти координати точки викидів.
15. ЯКЩО регіон без промисловості ТА CO<sub>2</sub> – високий, ТО джерело — транспорт.
16. ЯКЩО кількість авто зросла > 20%, ТО оновити прогноз моделі.
17. ЯКЩО середній CO<sub>2</sub> зростає щодня > 5%, ТО активувати сценарій оцінки ризиків.
18. ЯКЩО значення CO<sub>2</sub> уночі вище ніж удень, ТО можлива локальна акумуляція.
19. ЯКЩО громадський транспорт добре розвинений ТО рівень CO<sub>2</sub> зменшується.
20. ЯКЩО кількість електромобілів зростає, ТО середні викиди CO<sub>2</sub> знижуються.
21. ЯКЩО рівень викидів постійно зростає, ТО запропонувати нові екозони.
22. ЯКЩО виявлено новий осередок підвищених викидів, ТО сповістити оператора.
23. ЯКЩО сенсор фіксує відхилення понад 10% від норми, ТО провести калібрування.

24. ЯКЩО показники CO<sub>2</sub> нестабільні протягом доби, ТО включити часову аналітику.
25. ЯКЩО значення перевищує 1000 ppm, ТО інформувати місцеву владу.
26. ЯКЩО у місті не працює громадський транспорт, ТО рівень CO<sub>2</sub> ймовірно зросте.
27. ЯКЩО кількість авто з дизельними двигунами > 60%, ТО прогнозувати викиди як високі.
28. ЯКЩО рух у години пік інтенсивний, ТО рівень CO<sub>2</sub> зростає.
29. ЯКЩО фільтри авто несправні, ТО викиди збільшуються.
30. ЯКЩО у місті є велоінфраструктура, ТО рівень CO<sub>2</sub> має тенденцію до зниження.
31. ЯКЩО авто проходить регулярний технічний огляд, ТО його викиди нижчі.
32. ЯКЩО у певному районі CO<sub>2</sub> стабільно високий, ТО рекомендувати транспортну розв'язку.
33. ЯКЩО сенсор передає дані з інтервалом > 10 хв, ТО попередити про затримку даних.
34. ЯКЩО накопичено 30+ днів даних, ТО запускати довгострокову аналітику.
35. ЯКЩО пік CO<sub>2</sub> припадає на конкретні години, ТО пропонувати коригування графіку руху.
36. ЯКЩО впроваджено електробуси, ТО зменшити прогноз викидів у районі їх курсування.
37. ЯКЩО вулиця має 2+ смуги для руху, ТО ризик затору менший.
38. ЯКЩО дорога вузька та завантажена, ТО затримка транспорту підвищує CO<sub>2</sub>.
39. ЯКЩО прогноз погоди – безвітряна погода, ТО викиди погано розсіюються.

40. ЯКЩО транспорт зупиняється  $> 30\%$  часу руху, ТО неефективні витрати пального.

41. ЯКЩО концентрація CO<sub>2</sub> має пікові значення  $>$  трьох точок, ТО провести перехресний аналіз.

42. ЯКЩО сенсори фіксують стабільні зниження, ТО система фіксує покращення.

43. ЯКЩО спостерігається  $> 5$  сплесків CO<sub>2</sub> на добу, ТО оцінити аномалію.

44. ЯКЩО встановлено транспортні обмеження, ТО через добу провести повторний замір.

45. ЯКЩО у центрі міста CO<sub>2</sub>  $> 800$  ppm, ТО запропонувати розвантаження трафіку.

46. ЯКЩО рух автівок зупинено, ТО перевірити, чи зменшується CO<sub>2</sub>.

47. ЯКЩО в місті запрацював новий промисловий об'єкт, ТО змінити базову карту джерел.

48. ЯКЩО кількість авто в місті перевищила норму щільності, ТО прогнозувати кризу.

49. ЯКЩО виявлено сенсор без сигналу  $> 1$  год, ТО повідомити про несправність.

50. ЯКЩО виконано покращення дорожньої інфраструктури, ТО оновити прогностичну модель.

Ці правила можуть використовуватись у rule-based expert systems або як логіка для побудови інтелектуальної системи моніторингу довкілля, а також може використовуватись в якості підсистеми моніторингу в складі кіберфізичної системи відстежування та аналізу

## 2.5 Висновки

Моделювання процесу моніторингу CO<sub>2</sub> є ключовим інструментом у формуванні екологічно орієнтованої транспортної політики. Застосування таких

моделей дає змогу не лише зафіксувати поточні рівні викидів, а й сформувати стратегії майбутнього розвитку міських систем з урахуванням кліматичних викликів. У дослідженні встановлено, що відстежування викидів може здійснюватися на різних масштабних рівнях — від мікроскопічного до глобального. Мікросимуляції, агентно-орієнтовані моделі, а також системна динаміка дозволяють охопити як поведінкові аспекти пересування, так і структуру транспортної мережі та її взаємодію з іншими підсистемами міста.

Особливу увагу було приділено порівнянню моделей та визначенню сфер їх доцільного застосування. Зокрема, емпіричні методи є ефективними для базового аналізу, тоді як моделі з використанням штучного інтелекту та супутникових даних забезпечують точний і масштабний моніторинг. Техніко-економічні моделі дозволяють проводити аналіз впливу транспорту на загальноекономічному рівні, що є особливо важливим для формування державної політики у сфері клімату. Процес аналізу викидів CO<sub>2</sub> в атмосферу структурується у вигляді послідовних етапів: від збору вхідних даних до візуалізації результатів. Особлива роль належить етапу обробки та валідації даних, оскільки якість інформації безпосередньо впливає на точність кінцевих висновків. Застосування моделей емісій, які враховують тип пального, масу транспортного засобу, маршрут, швидкість і стиль водіння, дає змогу отримати точну оцінку впливу кожного елемента транспортної системи.

Узагальнюючи, можна стверджувати, що найбільш ефективною є комбінована модель, яка інтегрує кілька типів підходів: від мікросимуляцій до системної динаміки. Вона дозволяє формувати гнучкі рішення для адаптації міської інфраструктури до викликів зміни клімату, зменшення транспортного забруднення і підвищення стійкості міського середовища загалом. Результати дослідження створюють підґрунтя для розробки цифрових платформ управління мобільністю та екологічним станом міста, а також можуть бути використані для навчання, консультування органів влади та підтримки громадських ініціатив у сфері сталого транспорту.

### 3 МЕТОД ВІДСТЕЖУВАННЯ І АНАЛІЗУ ВИКИДІВ ВУГЛЕЦЮ В АТМОСФЕРУ

#### 3.1 Аналіз існуючих методів обліку викидів вуглецю CO<sub>2</sub> в атмосферу

Облік вуглецю зазвичай стосується розрахунку та перевірки викидів вуглецю за певний період для окремих осіб або організацій. Облік викидів вуглецю передбачає обчислення та реєстрацію викидів з різних джерел, таких як транспорт, будівлі та промислові процеси [21].

Метод обліку вуглецю включає метод коефіцієнта викидів і метод матеріального балансу [22].

Метод коефіцієнта викидів (МКВ) має розвинену систему розрахунків і достатню теоретичну основу, яка є найбільш поширеною. Керівні принципи МКВ щодо національних кадастрів парникових газів визначають коефіцієнт викидів як характерні викиди парникових газів на одиницю виробництва або споживання [23].

Основним принципом методу матеріального балансу є закон збереження маси, який стверджує, що вхідні матеріали дорівнюють сумі вихідних і втрат матеріалів [24]. Реалізація методу обліку вуглецю значною мірою залежить від точності та повноти. Наприклад, умови виробництва, типи палива та стани згоряння палива повинні бути точними та вичерпними, щоб охопити весь процес діяльності з викидів вуглецю. Однак більшість малих і середніх підприємств не можуть реєструвати повні дані про промислове виробництво. Крім того, статистичні засоби та технології обробки даних є складними для підтримки застосування методу матеріального балансу.

Метод моніторингу вуглецю використовує обладнання для моніторингу в реальному часі для вимірювання CO<sub>2</sub> викидів. Порівняно з обліком вуглецю, моніторинг вуглецю зосереджується на аналізі та обробці даних моніторингу за допомогою апаратних засобів, які підкреслюють відстеження викидів у реальному часі. Впровадження методу моніторингу вуглецю широко координується з різними технологіями, такими як дистанційне зондування та зондування даних

про навколишнє середовище. Метод моніторингу безпосередньо вимірює швидкість потоку, витрату та концентрацію парникових газів у конкретному середовищі за допомогою вимірювальних пристроїв, визнаних відповідними національними департаментами. На основі даних вимірювань, визначених відділом охорони навколишнього середовища, розраховується загальна кількість викидів ПГ [25].

Вимірювання вуглецю передбачає кількісне визначення парникових газів, що викидаються в атмосферу внаслідок діяльності людини протягом певного періоду часу, використовуючи різні методи обробки даних, включаючи математичне моделювання, тощо [26]. Окрім отримання точних даних вимірювань, наголос у вимірюванні вуглецю лежить на розумному управлінні даними, необхідним для точного визначення викидів вуглецю. Процес розгортається послідовно, починаючи зі збору даних моніторингу з подальшою обробкою даних протягом визначеного періоду часу. Отже, вимірювання вуглецю забезпечує статичне представлення викидів вуглецю за певний період.

Вимірювання вуглецю – це метод ефективного підрахунку викидів вуглецю, що утворюються енергетичними установами, організаціями та підприємствами під час їх промислової виробничої діяльності в режимі реального часу, особливо з використанням затверджених кількісних підходів та одиниць. Вимірювання вуглецю використовує попередньо оброблені обладнанням обчислювальні моделі для точного запису та передачі даних про викиди.

Облік вуглецю – це об'єднання записаних даних про діяльність окремих осіб, організацій і підприємств, пов'язаних із викидами вуглецю, обчислення загальних викидів вуглецю за допомогою математичного моделювання або методів економічної статистики.

Моніторинг вуглецю наголошує на отриманні прямих даних про викиди вуглецю в режимі реального часу за допомогою засобів моніторингу без обробки. Принципова різниця між обліком вуглецю та вимірюванням вуглецю полягає в часовій послідовності збору та обробки даних моніторингу. Технологія обліку вуглецю передбачає встановлення попередньо визначеної моделі обробки, прямий

моніторинг вхідних даних і обчислення в режимі реального часу в межах засобів вимірювання для отримання динамічних результатів викидів вуглецю. Метод вимірювання має менше проміжних кроків у процесі впровадження, ніж методи обліку вуглецю, і забезпечує динамічні дані порівняно з обліком вуглецю [27].

З точки зору точності та безперервності, дані моніторингу в реальному часі демонструють високу продуктивність при використанні професійного обладнання та систем виявлення газу.

Наприклад, вугільна електростанція Neurath, запровадила систему моніторингу викидів вуглецю на основі Інтернету речей (IoT) для підвищення ефективності управління вуглецем [28]. Ця система використовує високоточні CO<sub>2</sub> датчики, встановлені в димоходах і витяжних каналах, що дозволяють контролювати CO<sub>2</sub> в режимі реального часу концентрації у викидах. Дані безперервно передаються на хмарну платформу через бездротові мережі для зберігання та аналізу [29]. Завдяки інтеграції алгоритмів машинного навчання система може передбачати тенденції високих викидів і автоматично видавати сповіщення. У періоди високого ризику викидів, оператори можуть зменшити викиди, оптимізувавши швидкість подачі палива та регулюючи температуру згоряння [30, 31]. Завдяки цій системі, електростанція Neurath досягла приблизно 15 % скорочення викидів вуглецю. Система автоматично створює звіти про викиди вуглецю, які регулярно надсилаються до Європейського агентства з навколишнього середовища для забезпечення точності та прозорості даних про викиди. Крім того, міська влада Лос-Анджелеса складає щорічний кадастр викидів вуглецю, що охоплює основні сектори, такі як будівництво, транспорт і промисловість, щоб досягти цільових показників скорочення вуглецю [32]. Процес обліку в Лос-Анджелесі об'єднує дані місцевих енергетичних компаній і відділу транспорту, посиляючись на останні коефіцієнти викидів, надані Каліфорнійською радою з повітряних ресурсів (CARB), щоб забезпечити точність і політичну відповідність розрахунків [33]. Проте дослідження показують, що, оскільки метод коефіцієнта викидів спирається виключно на оцінки, його результати щодо викидів вуглецю, як правило, приблизно на 5–30 % вищі

порівняно з даними моніторингу в реальному часі. Відповідно, середня розбіжність у точності даних між методами моніторингу вуглецю та методами обліку може сягати до 17 %. Метод моніторингу вуглецю є новим напрямком у промислових і наукових дослідженнях щодо скорочення викидів вуглецю завдяки його ефективності в режимі реального часу та інтуїтивно зрозумілим моніторинговим даним. Вимірювання вуглецю включає процедури обліку викидів вуглецю та методи моніторингу. Ці два компоненти співпрацюють і взаємно підсилюють один одного, щоб забезпечити підтримку даних, необхідних для остаточного кількісного визначення вуглецю. З точки зору моніторингу вуглецю для стаціонарних джерел, CEMS наразі є домінуючим методом [34].

Технологія моніторингу вуглецю служить загальним терміном, який охоплює всі технології, спрямовані на кількісне визначення викидів вуглецю в різних джерелах і секторах. CEMS – це підмножина технологій моніторингу вуглецю, яка відноситься до широко використовуваного методу моніторингу викидів із фіксованих джерел у режимі реального часу. Технології моніторингу концентрації звужують сферу застосування до конкретного вимірювання CO<sub>2</sub> рівнів, що є ключовим для точного кількісного визначення викидів парникових газів. Визнаючи актуальність і широку застосовність технології CEMS для різних газів, вона передбачає розробку складних апаратних компонентів і датчиків, призначених для моніторингу та кількісного визначення викидів від стаціонарних джерел. Точне виявлення та вимірювання концентрації CO<sub>2</sub> є ключовими елементами в рамках CEMS. Технології моніторингу концентрації CO<sub>2</sub>, у свою чергу, роблять значний внесок у вдосконалення можливостей моніторингу викидів. Точне виявлення та вимірювання концентрації CO<sub>2</sub> є критично важливими складовими систем безперервного моніторингу викидів які застосовуються на промислових підприємствах для контролю за дотриманням екологічних норм. CO<sub>2</sub>, як один із основних парникових газів, вимагає постійного контролю, особливо в енергетичному секторі, металургії, цементній промисловості та на сміттєспалювальних заводах.

CEMS складаються з кількох ключових компонентів: газоаналізаторів, пробовідбірників, систем кондиціонування проб, контролерів даних та програмного забезпечення для збору та обробки інформації (рисунок 3.1). Газоаналізатори, зокрема, використовують інфрачервону спектроскопію для точного визначення концентрації CO<sub>2</sub> у викидах. Системи кондиціонування проб забезпечують стабільні умови для аналізу, видаляючи вологу та інші домішки, які можуть впливати на точність вимірювань.

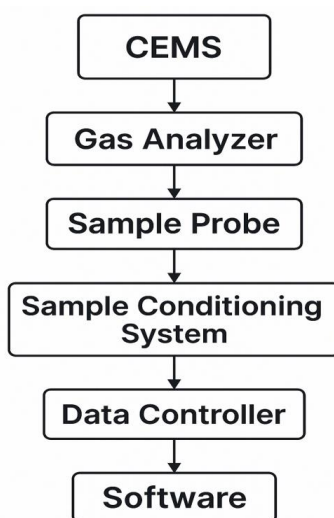


Рисунок 3.1 – Структурна схема технології CEMS [34]

Контролери даних, такі як 8864 Data Controller, відіграють важливу роль у зборі, перевірці та передачі даних до систем обробки, забезпечуючи надійність та точність інформації. Програмне забезпечення, наприклад StackVision або CEMDAS, дозволяє в режимі реального часу відстежувати викиди, генерувати звіти та забезпечувати відповідність нормативним вимогам [35].

Регулярне калібрування та технічне обслуговування компонентів CEMS є необхідними для підтримання точності вимірювань. Це включає перевірку лінійності, очищення датчиків та оновлення програмного забезпечення.

Загалом, інтеграція сучасних технологій у CEMS дозволяє підприємствам ефективно контролювати викиди CO<sub>2</sub>, сприяючи зменшенню негативного впливу на навколишнє середовище та забезпечуючи дотримання екологічних стандартів.

### 3.2 Відстежування та аналіз викидів вуглецю CO<sub>2</sub> від транспорту м.Хмельницький

Для формування методу відстежування та аналізу викидів вуглецю CO<sub>2</sub> розглянемо поточну ситуацію у м.Хмельницькому. Наразі, згідно з даними, кількість зареєстрованих транспортних засобів у Хмельницькому за останні п'ять років зросла майже втричі, що призводить до збільшення викидів забруднюючих речовин в атмосферу [20].

Основними джерелами викидів є пересувні джерела, у першу чергу – автотранспорт [20]. Згідно даних Хмельницької міської ради, у 2020 році спостерігалось зменшення викидів оксиду вуглецю на 20,71% порівняно з 2019 роком, що було обумовлено локдауном та зменшенням транспортної активності.

Наразі, ситуація суттєво змінилась, оскільки кількість транспортних засобів значно зросла.

Розглянемо методи моніторингу та аналізу викидів, які використовуються в м.Хмельницький.

Перша група методів, це розрахункові методи (інвентаризація). Цей підхід базується на збиранні та аналізі статистичних даних щодо діяльності, яка потенційно спричиняє викиди забруднюючих речовин (наприклад, транспорт, енергетика, промисловість, житловий сектор тощо). Він дозволяє оцінити кількісні показники викидів парникових газів; аналізувати тенденції змін у часі; розробляти стратегії скорочення викидів.

У місті Хмельницький застосовується базовий кадастр викидів CO<sub>2</sub>, який є частиною концепції сталого енергетичного розвитку в рамках участі в угоді мерів. Він дозволяє визначити обсяги викидів від різних секторів, включаючи транспорт [20]. Цей метод не вимагає безпосередніх вимірювань у повітрі, натомість розрахунки базуються на даних про використання палива, транспортний потік, споживання електроенергії тощо.

Лабораторний аналіз проб повітря використовується для визначення концентрацій забруднюючих речовин у різних районах міста [20]. Це один із

найнадійніших способів безпосереднього вимірювання рівня забруднення повітря. Він включає такі етапи:

- забір зразків повітря в різних точках міста (особливо біля доріг, у житлових районах, поблизу промислових об'єктів);
- подальший аналіз у спеціалізованій лабораторії;
- визначення концентрацій таких речовин, як: оксид вуглецю (CO<sub>2</sub>), діоксид азоту (NO<sub>2</sub>), діоксид сірки (SO<sub>2</sub>), озон (O<sub>3</sub>), тверді частинки (PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>).

Цей метод дозволяє з високою точністю відслідковувати перевищення допустимих норм і виявляти потенційні екологічні ризики.

Друга група методів використовує мобільні сенсори та дрони, за допомогою яких здійснюється локальний моніторинг викидів у реальному часі, особливо в зонах з інтенсивним рухом транспорту. Цей сучасний підхід дає змогу здійснювати динамічний моніторинг повітря у режимі реального часу.

Особливостями використання таких технологій є те, що:

- мобільні станції контролю можуть бути розміщені на автомобілях або спеціальних платформах;
- дрони з екосенсорами літають над різними частинами міста, фіксуючи локальні показники забруднення;
- дані одразу передаються до аналітичного центру або онлайн-системи для обробки.

Перевагами використання є те, що можна оперативно реагувати на зміни в умовах повітря, можна визначити так звані “гарячі точки” забруднення та можливість забезпечення широкого охоплення території без необхідності встановлення стаціонарних пунктів.

Шляхами зменшення викидів CO<sub>2</sub> від транспорту можуть бути наступні.

1. Розвиток громадського транспорту. Збільшення кількості маршрутів та оновлення парку громадського транспорту сприятиме зменшенню використання приватних автомобілів.

2. Підтримка електромобільності. Створення інфраструктури для зарядки електромобілів та стимулювання їх придбання.

3. Впровадження велосипедної інфраструктури. Розвиток велодоріжок та безпечних умов для велосипедистів зменшить залежність від автомобілів.

4. Застосування альтернативних видів палива. Використання біометану та інших відновлюваних джерел енергії для транспорту.

Отже, викиди вуглецю (CO<sub>2</sub>) від транспорту є значним фактором забруднення атмосферного повітря в місті Хмельницький. Ще однією проблемою, окрім значного збільшення автотранспорту є відсутність детальних даних. Через зміну форми статистичної звітності у 2016 році, дані щодо викидів забруднюючих речовин від пересувних джерел у місті відсутні, що ускладнює точний аналіз ситуації [20].

Також, що стосується методів моніторингу та аналізу, то у місті є стаціонарні пости спостереження. У Хмельницькому функціонують два стаціонарні пости моніторингу якості повітря, розташовані на вулиці Чорновола, 122 та на перетині вулиць Романа Шухевича і Олімпійської. Вони здійснюють спостереження за 19-ма інгредієнтами, включаючи оксид вуглецю та діоксид азоту [20].

Ще одним важливим моментом є те, що існує План дій «Зелене місто». У рамках цього плану передбачено заходи з покращення екологічної ситуації, зокрема зменшення викидів від транспорту шляхом розвитку громадського транспорту та впровадження екологічно чистих технологій [20].

### 3.3 Проектування кіберфізичної системи відстежування та аналізу викидів CO<sub>2</sub> у атмосферу

Впровадження систем відстежування CO<sub>2</sub> стимулює розвиток нових технологій, таких як відновлювана енергетика, системи зберігання енергії та технології уловлювання і зберігання вуглецю. Ці технології спрямовані на зменшення вуглецевого сліду та сприяють досягненню вуглецевої нейтральності.

Кіберфізична система (КФС) відстежування і аналізу викидів вуглецю (CO<sub>2</sub>) в атмосферу – це інтегрована система, яка поєднує фізичні компоненти (датчики, камери, пристрої збору даних) з цифровими технологіями (аналітичні алгоритми, штучний інтелект, хмарні обчислення). Вона призначена для точного моніторингу викидів парникових газів, аналізу даних в режимі реального часу та надання рекомендацій для скорочення викидів.

Архітектура кіберфізичної системи для моніторингу CO<sub>2</sub> складається з наступних рівнів (рисунок 3.2):

1) фізичний рівень (збір даних), на якому відбувається збір даних про викиди CO<sub>2</sub> через різноманітні датчики та пристрої, встановлені на джерелах викидів або в навколишньому середовищі. В якості датчиків та сенсорів можуть бути:

- сенсори CO<sub>2</sub>, призначені для безпосереднього вимірювання концентрації вуглецю у повітрі; встановлюються на заводах, транспортних системах та в будівлях;
- метеорологічні сенсори, призначені для вимірювання параметрів навколишнього середовища, такі як температура, тиск, вологість, які можуть впливати на поширення викидів;
- супутники та дрони використовуються для моніторингу великих територій та аналізу загальної концентрації CO<sub>2</sub> в атмосфері на регіональному або глобальному рівні;

2) рівень локальної обробки даних містить:

- Інтернет речей (IoT) – мережа сенсорів і пристроїв, яка забезпечує передачу даних в режимі реального часу на локальні контролери або шлюзи для початкової обробки;
- локальні сервери та контролери – на цьому рівні дані від сенсорів зчитуються і фільтруються, щоб визначити ключові показники (наприклад, надмірні викиди CO<sub>2</sub> в певних зонах);

3) мережевий рівень (зв'язок і передача даних) містить:

- бездротові мережі використовуються для передачі даних від сенсорів до центральної системи (Wi-Fi, 5G, LoRaWAN або інші технології);
- шлюзи та IoT-платформи забезпечують інтеграцію різних сенсорних систем і передачу даних на центральні або хмарні сервери для глибшого аналізу;
- 4) на хмарному рівні обробляються величезні масиви даних з різних джерел, наприклад:
  - великі дані та аналітичні платформи застосовуються для аналізу даних у великих масштабах, забезпечуючи прогнозування викидів, виявлення аномалій та розуміння довгострокових тенденцій;
  - алгоритми машинного навчання та штучного інтелекту допомагають автоматизувати аналіз даних та надавати рекомендації щодо оптимізації роботи підприємств або транспортних систем для зниження викидів CO<sub>2</sub>;
  - моделі прогнозування використовуються для оцінки можливого впливу певних політик або заходів зі зниження викидів, що допомагає в управлінні стратегіями декарбонізації;
- 5) інтерфейс користувача і прийняття рішень складається з:
  - панелі моніторингу та візуалізації, які включають інтерактивні інтерфейси, через які оператори або менеджери отримують дані про викиди, порівняння з попередніми періодами та рекомендації щодо покращення ситуації;
  - модуль прийняття рішень системою у реальному часі, де на основі аналізу даних, система може автоматично пропонувати зміни для зменшення викидів, наприклад, змінювати роботу обладнання або перерозподіляти ресурси.
- б) автоматизоване управління включає:
  - контроль викидів, де система автоматично регулює параметри виробничих процесів, транспортних засобів або енергетичних систем для зниження викидів CO<sub>2</sub> на основі даних, отриманих від сенсорів і аналітичних моделей;
  - інтеграцію з іншими системами, тобто КФС може бути інтегрована з енергетичними мережами, системами відновлюваної енергії або

інфраструктурою розумних міст для забезпечення максимальної ефективності в управлінні викидами.

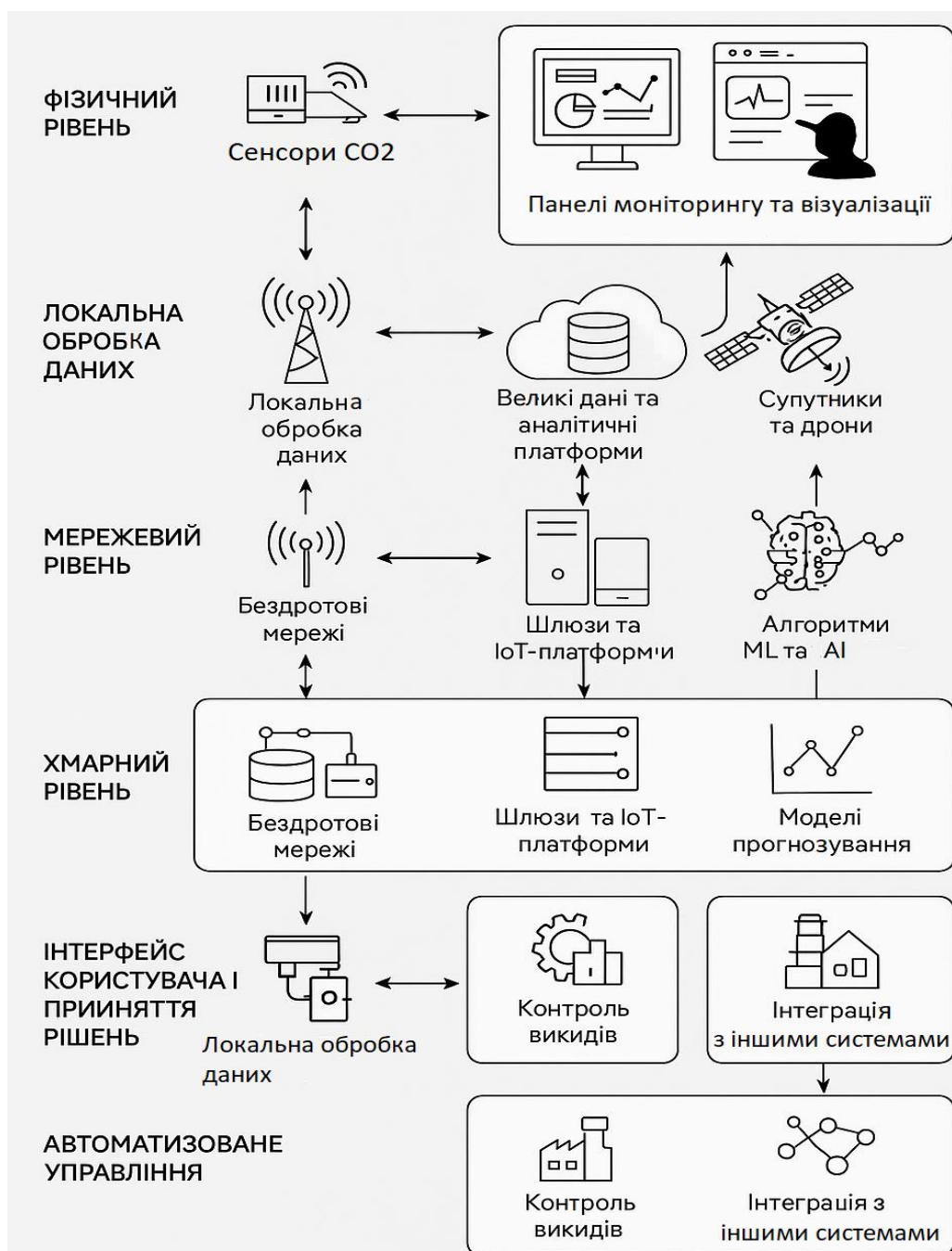


Рисунок 3.2 – Структурна схема кіберфізичної системи відстежування та аналізу викидів CO<sub>2</sub> в атмосферу

Для моніторингу викидів CO<sub>2</sub> від транспорту застосовуються різні технології та сенсори, які інтегруються в кіберфізичну систему. Розглянемо основні компоненти більш детально.

Важливою складовою для моніторингу викидів є так звані вихлопні газоаналізатори (On-board Emissions Measurement Systems, PEMS). Це переносні прилади, встановлені безпосередньо на транспортному засобі для вимірювання викидів у реальних умовах експлуатації. За допомогою таких приладів можна вимірювати такі речовини, як CO<sub>2</sub>, CO, NO<sub>x</sub>, CH<sub>4</sub>, PM (тверді частки). Технології, які використовуються при цьому, це ІЧ-абсорбція (NDIR), хемілюмінесценція, лазерна спектроскопія. При ІЧ-абсорбції (NDIR – Nondispersive Infrared Absorption) газові молекули, такі як CO<sub>2</sub>, мають властивість поглинати інфрачервоне (ІЧ) випромінювання на певних довжинах хвиль [36]. NDIR-сенсор випромінює ІЧ-світло через камеру з газом і вимірює, скільки світла поглинуто на характерній довжині хвилі (наприклад, для CO<sub>2</sub> – ~4.26 мкм). Компонентами такої системи при цьому є ІЧ-джерело світла, оптична камера з фільтром для потрібної довжини хвилі та детектор, який вимірює інтенсивність світла після проходження через газ. Перевагами є те, що є можливість отримати реальні дані в динаміці руху, висока точність, низький рівень помилкових спрацьовувань та підходить для тривалого моніторингу. До недоліків можна віднести те, що якість залежить від чистоти оптики та можуть бути спотворення присутністю водяної пари або пилу без фільтрації.

Наступним методом для моніторингу викидів є хемілюмінесценція (для NO<sub>x</sub>) [37]. Метод використовується переважно для вимірювання оксидів азоту (NO, NO<sub>2</sub>). При реакції оксиду азоту (NO) з озоном (O<sub>3</sub>) утворюється збуджене молекулярне NO<sub>2</sub>, яке переходить у стабільний стан із випромінюванням світла (хемілюмінесценція). Компонентами такого методу є реактор для змішування NO та O<sub>3</sub>, фотодетектор для фіксації інтенсивності світіння та оптичні фільтри для виділення потрібного діапазону випромінювання. До переваг можна віднести високу точність для NO, швидкий відгук, можна окремо визначати NO і NO<sub>2</sub> (через попередню конверсію).

Недоліками є те, що не можна виміряти CO<sub>2</sub> напряму, вимагає регулярного обслуговування та використовує реактиви (озон).

Метод лазерної спектроскопії (Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy, TDLAS) використовується вузькосмугове лазерне випромінювання (в інфрачервоному або ближньому ІЧ-діапазоні), яке проходить через зразок газу [38]. Газ поглинає лазерне світло на точній довжині хвилі, характерній для CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> або інших газів. Вимірюється ослаблення інтенсивності лазера – це і є сигнал про концентрацію газу. До переваг відносимо дуже високу селективність (може розрізняти окремі гази навіть у складних сумішах), високу чутливість та стабільність, а також підходить для мобільних і дистанційних вимірювань (включно з дронами). Недоліками є те, що цей метод дорожчий в реалізації, вимагає точної калібровки, чутливий до вирівнювання променя та умов середовища.

Системи навігації (GPS) і бортовий інтерфейс (CAN-шина) дають інформацію про швидкість, прискорення та режим роботи двигуна [39]. Їх призначенням є те, що вони співвідносять викиди із поведінкою автомобіля (рисунок 3.3). GPS дозволяє отримувати точні координати транспортного засобу в реальному часі, а також розраховувати швидкість, напрямок руху та маршрут.

Інформація, яку він надає:

- поточна локація (координати) визначення географічного положення для аналізу викидів у конкретних зонах;
- швидкість руху допомагає оцінити навантаження на двигун;
- прискорення/уповільнення важливі для розрахунку миттєвих викидів;
- маршрут руху дозволяє відслідковувати джерела забруднення по місту або трасі;
- висота над рівнем моря впливає на роботу двигуна та витрати пального.

Сферами застосування є геоприв'язка викидів, виявлення зон з інтенсивним забрудненням, побудова моделей дорожнього навантаження.

До переваг відносяться забезпечення контексту для аналізу викидів (наприклад, трафік, тип дороги, режим руху).

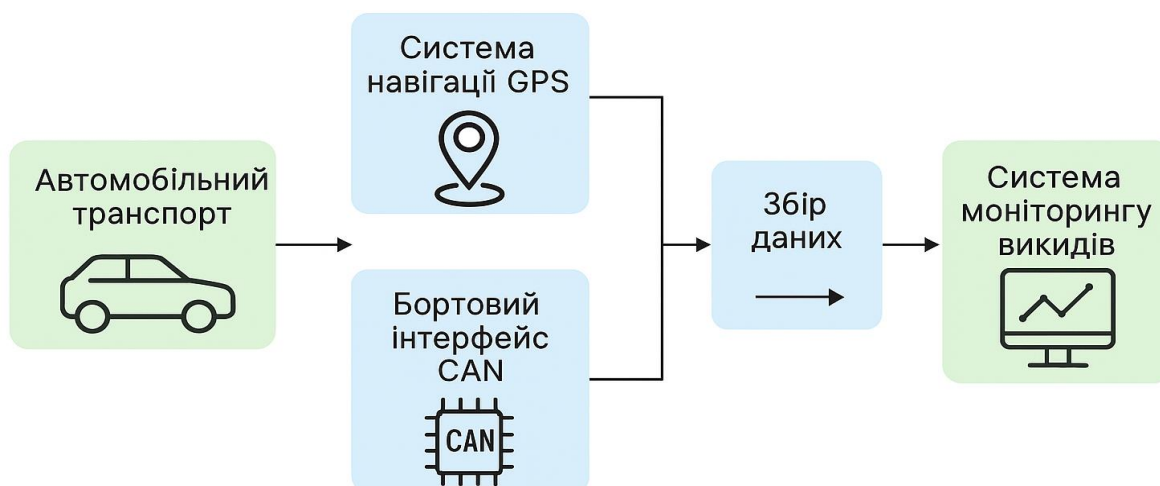


Рисунок 3.3 – Схема інтеграції GPS та CAN у систему моніторингу викидів

Бортова мережа транспортного засобу CAN-шина (Controller Area Network) представляє собою внутрішній цифровий інтерфейс автомобіля, що зв'язує всі електронні блоки управління (двигун, трансмісію, ABS, клімат-контроль тощо).

Розглянемо типи інформації, яку він надає:

- обороти двигуна (RPM) показник який вказує навантаження на двигун;
- температура охолоджуючої рідини / масла показує режим роботи;
- витрати пального використовуються для оцінки CO<sub>2</sub> викидів;
- статус дросельної заслінки важлива для розрахунку об'ємного потоку повітря і пального;
- положення педалі акселератора для визначення стилю водіння (економний, агресивний);
- швидкість обертання коліс / швидкість авто для контролю динаміки;
- стани двигуна (запуск, холостий хід, активне навантаження) потрібні для аналізу фазових викидів.

Застосовувати можна для точного аналізу миттєвих і сумарних викидів CO<sub>2</sub> та NO<sub>x</sub>, ідентифікації режимів роботи, що генерують найбільше викидів, оптимізації режимів керування автомобілем для зниження забруднення.

Комбінація GPS та CAN-шини створює потужну систему для мобільного моніторингу викидів у реальному часі. Наприклад, якщо транспортний засіб різко

прискорюється в щільному міському трафіку, система фіксує і координати, і режими двигуна, та дозволяє оцінити екологічну ефективність водіння.

IoT-телематичні пристрої – це компактні вбудовані апарати, що встановлюються на транспорт, промислові об'єкти або екологічні станції. Вони здатні в режимі реального часу передавати зібрані дані на хмарні платформи, де проводиться подальша обробка, зберігання та аналіз. Сенсорні пристрої, встановлені на транспортних засобах або в зонах моніторингу, забезпечують багатфункціональний збір екологічно значущих параметрів, зокрема за допомогою газоаналізаторів відбувається безперервне вимірювання концентрації вуглекислого газу (CO<sub>2</sub>), оксидів азоту (NO<sub>x</sub>), твердих частинок (PM<sub>2.5</sub>/PM<sub>10</sub>), що дозволяє оперативно оцінювати рівень забруднення атмосферного повітря. Крім того, вбудовані модулі GPS забезпечують геоприв'язку отриманих даних, дозволяючи будувати карти розподілу викидів у просторі та часі.

Обробка даних безпосередньо на пристрої (edge computing) зменшує трафік і підвищує швидкість реакції. Вбудовані контролери здатні фільтрувати, агрегувати та попередньо аналізувати дані до їх надсилання.

При передачі даних на сервер або у хмару використовуються технології бездротової передачі. Технології бездротової передачі даних відіграють ключову роль у системах моніторингу викидів, забезпечуючи швидке та ефективне передавання інформації від сенсорів і пристроїв збору даних до центральних серверів, аналітичних платформ або хмарних сховищ. Завдяки цим технологіям можливе безперервне відстеження рівня викидів у реальному часі без необхідності прокладення дротів або складної інфраструктури, що особливо важливо для мобільних об'єктів, таких як транспортні засоби, або для важкодоступних зон. Серед поширених типів бездротового зв'язку використовують Wi-Fi для локальних мереж, мобільні мережі 4G/5G для широкопasmової передачі на великі відстані, а також спеціалізовані рішення на кшталт LoRaWAN чи NB-IoT, які забезпечують енергоефективну роботу пристроїв із невеликою пропускнуою здатністю, але великою зоною покриття.

Вибір конкретної технології залежить від потреб системи: швидкості, обсягу переданих даних, енергоспоживання і стабільності сигналу.

Наприклад, 4G / LTE забезпечують високу швидкість передачі даних та підходять для потокового відео, складної телеметрії. В 5G спостерігається низька затримка (1 мс) та надвисока пропускна здатність. Підходить для реального часу та великої кількості пристроїв.

NB-IoT (Narrowband IoT) – енергоефективна технологія для простих пристроїв із низьким трафіком. Перевагою є довгий термін служби батареї, висока проникність сигналу.

LoRaWAN технологія працює на великі відстані з мінімальним енергоспоживанням. Підходить для розріджених мереж датчиків, наприклад у сільській місцевості.

Дистанційні методи моніторингу (Remote Sensing Devices, RSD) – це сучасні технології вимірювання рівня викидів, які дозволяють отримувати дані про забруднення повітря без необхідності фізичного контакту з джерелом викидів, стаціонарні сенсорні платформи, встановлені над/поперек дороги, що «зчитують» викиди при проїзді автомобіля. Основний принцип їх роботи ґрунтується на аналізі складу вихлопних газів транспортних засобів під час їх руху, без встановлення сенсорів на сам об'єкт. Найчастіше RSD-системи встановлюються на узбіччях доріг і використовують лазерні або інфрачервоні промені, які проходять крізь вихлопні гази автомобіля, що проїжджає повз. При цьому вимірюється концентрація таких речовин, як CO, CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, HC та димність. Завдяки високій швидкості спрацьовування система може обробляти тисячі транспортних засобів на день, що дозволяє отримувати репрезентативні дані про стан автопарку в реальних умовах експлуатації. Важливо, що RSD не лише дає змогу виявити транспортні засоби з надмірними викидами, але й використовується для статистичного аналізу ефективності екологічної політики, тестування нових стандартів і планування заходів із покращення якості повітря.

Супутниковий та аерофотознімальний моніторинг (для макрорівня) є важливими інструментами контролю викидів на макрорівні, що дають змогу

оцінювати просторовий розподіл концентрації парникових газів і забрудників у масштабах регіонів, країн або навіть усього континенту. Супутники, оснащені спектрометрами та іншими сенсорами, фіксують відбиття або випромінювання Земної поверхні та атмосфери в різних діапазонах електромагнітного спектра. Завдяки цьому вдається вимірювати вміст CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, NO<sub>2</sub> та інших сполук в атмосфері. Такі дані дозволяють створювати карти забруднення, аналізувати динаміку змін викидів, виявляти джерела значного навантаження на довкілля.

Аерофотознімання, яке виконується за допомогою дронів або літаків, забезпечує вищу роздільну здатність порівняно з супутниковими знімками і використовується для детального дослідження менших територій, наприклад, міських зон або промислових об'єктів. Воно дозволяє візуалізувати конкретні зони забруднення та оцінювати ефективність заходів із зменшення викидів. У поєднанні з іншими технологіями моніторингу ці методи створюють цілісну картину стану атмосфери та дозволяють оперативно реагувати на екологічні виклики [40].

Аналітичне програмне забезпечення та математичні моделі відіграють ключову роль у сучасних системах моніторингу викидів, перетворюючи великі обсяги сирих даних у корисну інформацію для прийняття рішень. Це програмне забезпечення обробляє дані з сенсорів, супутників, транспортних засобів або стаціонарних джерел викидів, фільтрує їх, виконує калібрування та проводить аналіз для виявлення закономірностей, трендів і аномалій. В основі багатьох таких систем лежать алгоритми машинного навчання та штучного інтелекту, які дозволяють не лише оцінювати поточну ситуацію, а й робити прогнози на основі історичних даних.

Моделі розповсюдження забруднень в атмосфері враховують метеорологічні умови, географію місцевості та характеристики джерел викидів. Це дозволяє змодельовати, як шкідливі речовини переміщуються у просторі, і оцінити їх вплив на навколишнє середовище та здоров'я населення. Також використовуються економетричні моделі для аналізу ефективності політик зменшення викидів і оптимізації заходів з декарбонізації. Аналітичні панелі, які є

частиною такого ПЗ, забезпечують візуалізацію результатів: графіки, карти, індикатори викидів та сценарії розвитку подій.

Додаткові сенсори та індикатори суттєво розширюють функціональність систем моніторингу викидів, забезпечуючи більш точну та комплексну оцінку впливу транспорту чи промислових об'єктів на довкілля. Температурні та тискові датчики відіграють важливу роль у корекції результатів вимірювань. Оскільки фізичні параметри, такі як температура повітря та атмосферний тиск, безпосередньо впливають на точність показань газоаналізаторів, їхня наявність дозволяє системі автоматично враховувати ці коливання та уникати похибок у розрахунках концентрацій шкідливих речовин.

Крім CO<sub>2</sub>, надзвичайно важливим є відстеження інших газів, зокрема метану (CH<sub>4</sub>), аміаку (NH<sub>3</sub>) та оксидів азоту (NO<sub>x</sub>), які мають суттєвий вплив на зміну клімату, здоров'я людей та якість повітря. Встановлення мультигазових сенсорів дозволяє створити цілісну екологічну картину викидів, що особливо актуально для транспорту з дизельними двигунами, аграрної техніки або промислових підприємств.

Ще одним важливим індикатором є витрати пального. Вимірювачі споживання пального дають змогу непрямо оцінювати рівень викидів CO<sub>2</sub>, оскільки між кількістю спаленого пального та утворенням вуглекислого газу існує прямий зв'язок. Ці дані можуть використовуватись для оперативного контролю за ефективністю роботи двигунів, оптимізації маршрутів та виявлення надмірного споживання, що свідчить про технічні несправності або неекономічний стиль керування.

У сукупності, ці додаткові сенсори підвищують точність системи моніторингу, дозволяють будувати прогностичні моделі та формувати обґрунтовані стратегії зменшення викидів.

До переваг кіберфізичної системи відстежування та аналізу викидів CO<sub>2</sub> можна віднести наступні:

1. Висока точність і оперативність.
2. Можливість прогнозування та аналізу отриманих даних.

3. Автоматизація управління.
4. Інтеграція з іншими системами.
5. Гнучкість масштабування.
6. Покращення прийняття рішень.

Завдяки сучасним сенсорам та аналітичним платформам КФС забезпечує точний та своєчасний моніторинг концентрації CO<sub>2</sub> в реальному часі.

Системи штучного інтелекту дозволяють не тільки аналізувати наявні дані, а й прогнозувати майбутні рівні викидів та ризики.

Можливість автоматичного регулювання процесів (наприклад, роботи, обладнання) дає можливість виконувати дії для зниження викидів без участі людини.

Систему можна адаптувати як для одного підприємства, так і для регіонального чи національного моніторингу.

Візуалізація даних та аналітичні звіти дають змогу керівництву швидко ухвалювати ефективні рішення щодо зменшення викидів.

Кіберфізичні системи для моніторингу викидів CO<sub>2</sub>, незважаючи на свої численні переваги, стикаються з низкою викликів, які впливають на їх ефективність та надійність. Одним із ключових викликів є інтеграція великої кількості різномірних пристроїв та сенсорів у єдину узгоджену інфраструктуру. Це вимагає високого рівня сумісності між компонентами, стандартизації протоколів обміну даними та надійного програмного забезпечення, здатного працювати з різними форматами інформації.

Іншим важливим питанням є забезпечення точності та достовірності даних. Сенсори можуть давати похибки внаслідок впливу зовнішніх умов, а також зношування або некоректного калібрування. Особливо складною є задача обробки великих обсягів інформації в реальному часі – це потребує значних обчислювальних ресурсів та наявності хмарної або децентралізованої інфраструктури.

Крім того, зберігання та передача екологічних і технічних даних вимагають дотримання принципів кібербезпеки. Будь-яке порушення в інформаційній

інфраструктурі може призвести до викривлення аналізу, збоїв в автоматизованому управлінні або навіть екологічних інцидентів. Також важливо враховувати етичні та юридичні аспекти збору даних, особливо якщо мова йде про міські середовища чи приватний транспорт.

Фінансові бар'єри теж становлять серйозний виклик: впровадження кіберфізичних систем вимагає значних інвестицій в обладнання, розробку програмного забезпечення, навчання персоналу та технічну підтримку. І, нарешті, важливою є готовність підприємств і органів влади до адаптації нових технологій, що потребує зміни підходів до управління, розвитку екологічної культури та довгострокової стратегії.

### 3.4 Метод відстежування і аналізу викидів CO<sub>2</sub> в кіберфізичній системі

Метод відстежування і аналізу викидів CO<sub>2</sub> в кіберфізичній системі базується на інтеграції фізичних сенсорів, цифрових технологій збору та обробки даних, а також інтелектуальних алгоритмів, що дозволяють здійснювати моніторинг у реальному часі, аналіз тенденцій і прийняття рішень. У основі лежить встановлення сенсорів (наприклад, NDIR-аналізаторів) на об'єктах контролю – це можуть бути транспортні засоби, промислові підприємства або елементи міської інфраструктури. Дані з сенсорів передаються через бездротові мережі на шлюзи або контролери, де відбувається попередня обробка, фільтрація та узагальнення.

Згодом інформація передається у хмарні обчислювальні системи або на центральні сервери, де застосовуються аналітичне програмне забезпечення, алгоритми машинного навчання та моделі прогнозування. Вони дозволяють не лише визначати рівень викидів у певний момент, але й виявляти аномалії, прогнозувати вплив змін у виробничих процесах або транспортних маршрутах, а також оцінювати ефективність екологічної політики. Завдяки інтерактивним інтерфейсам користувача дані виводяться у зручному вигляді для прийняття рішень операторами, менеджерами чи державними органами.

Таким чином, кіберфізична система створює замкнутий цикл — від вимірювання і передачі даних до аналізу, візуалізації та автоматичного регулювання процесів, що дозволяє суттєво знизити викиди CO<sub>2</sub> та підвищити екологічну ефективність систем.

У межах кіберфізичної системи, відстеження та аналіз викидів CO<sub>2</sub> здійснюється шляхом інтеграції фізичних сенсорів, обчислювальних потужностей та інтелектуальних алгоритмів (рисунок 3.4).

Для реалізації методу необхідно розглянути основні етапи, які є важливими для розроблення та реалізації метрду відстежування та аналізу викидів вуглецю CO<sub>2</sub> в атмосферу в кіберфізичній системі.

Для збору даних у реальному часі необхідно встановити датчики для вимірювання концентрації CO<sub>2</sub>, температури, вологості, швидкості вітру тощо. Дані можуть надходити з промислових підприємств, транспортних засобів, будівель або енергетичних систем.

Для реалізації процесу передачі даних, отриману інформацію необхідно передати до обчислювального центру через IoT-платформи або бездротові мережі.

В процесі обробки та аналізу отриманих даних використовуються моделі машинного навчання та штучного інтелекту, наприклад для аналізу трендів, виявлення аномалій, прогнозування викидів і оцінки ефективності декарбонізаційних заходів.

В процесі візуалізації та звітності дані виводяться на інтерактивні панелі моніторингу (dashboard), що дозволяє користувачам у режимі реального часу бачити рівень викидів та ефективність заходів зі зменшення вуглецевого сліду.

На основі аналізу даних та отриманих результатів, система може автоматично регулювати роботу обладнання, знижуючи споживання енергії або перенаправляючи навантаження на відновлювані джерела.

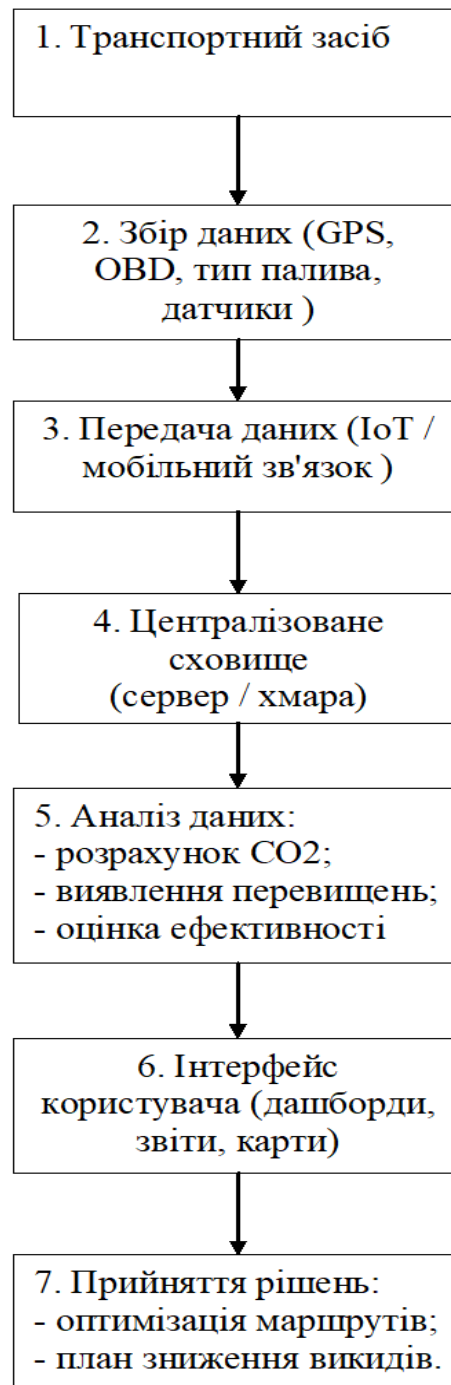


Рисунок 3.4 – Кроки методу відстежування та аналізу викидів CO<sub>2</sub> від автотранспорту

Розглянемо більш детальніше основні кроки методу відстежування та аналізу викидів CO<sub>2</sub> у атмосферу в кіберфізичній системі.

Крок 1. Збір вихідних даних про транспорт:

1.1 Інвентаризація всіх категорій транспортних засобів: приватний, громадський, комерційний.

1.2 Отримання статистики по автопарку (тип пального, середній вік, пробіг).

1.3 Аналіз динаміки зростання автотранспорту (річні показники реєстрацій).

Наприклад, у Хмельницькому з 2016 по 2023 трохи кількість транспорту зросла майже втричі.

Крок 2. Вибір репрезентативних зон для моніторингу:

2.1 Визначення найнавантажених транспортних артерій.

2.2 Встановлення зон впливу (школи, лікарні, житлові квартали поруч із дорогами).

2.3 Обґрунтоване розміщення стаціонарних або мобільних точок спостереження.

Наприклад, у Хмельницькому два пости: вул. Чорновола, 122 та вул. Р. Шухевича / Олімпійська.

Крок 3. Встановлення та використання засобів моніторингу:

3.1 Стаціонарні пости: вимірюють оксиди вуглецю, діоксид азоту, тверді частки (опосередковано враховують CO<sub>2</sub>).

3.2 Мобільні датчики, IoT-технології або дрони для локального збору даних.

3.3 Періодичний лабораторний аналіз проб (за наявності).

Крок 4. Розрахунок обсягів викидів CO<sub>2</sub>:

4.1 Використання IPCC або національних методик (розрахунок на основі спожитого пального).

4.2 Залучення даних з GPS, розкладів руху транспорту та паливних звітів.

4.3 Розрахунок викидів на одиницю транспорту, вулицю, район.

Крок 5. Візуалізація і картування:

5.1 Побудова карт зон з високою концентрацією викидів.

5.2 Ідентифікація гарячих точок міста — для пріоритетних заходів.

Крок 6. Інтеграція з екологічною стратегією:

6.1 Використання результатів для коригування плану сталого транспорту.

6.2 Пропозиції щодо зниження викидів: електротранспорт, велоінфраструктура, обмеження транзиту.

Крок 7. Інформаційне супроводження та звітування:

7.1 Публікація звітів у відкритому доступі (на сайті міста, екоплатформах).

7.2 Освітні кампанії щодо екологічних наслідків транспортного забруднення.

7.3 Стимулювання зміни поведінки громадян через прозорість даних.

3.5 Висновки до третього розділу

В третьому розділі розкрито ключові аспекти побудови сучасної цифрової системи для вирішення одного з найактуальніших викликів – контролю викидів парникових газів. Детально розглянуто технології, що дозволяють забезпечити високоточний та надійний моніторинг: від сенсорів на основі ІЧ-абсорбції, хемілюмінесценції та лазерної спектроскопії, до дистанційних та супутникових методів збору інформації. Також проаналізовано роль супутніх сенсорів – температурних, тискових, сенсорів CH<sub>4</sub>, NH<sub>3</sub>, NO<sub>x</sub> – у створенні повної картини екологічного навантаження.

Запропоновано кіберфізичну систему відстежування та аналізу викидів CO<sub>2</sub> у атмосферу, яка структурно складається з кількох інтегрованих рівнів: фізичного – де збираються дані з реального середовища; локального – для попередньої обробки інформації за допомогою IoT-пристроїв; мережевого – який забезпечує передачу даних у режимі реального часу; хмарного – де відбувається аналітика за допомогою алгоритмів штучного інтелекту та машинного навчання; і рівня прийняття рішень – що дозволяє оперативно реагувати на перевищення нормативів викидів. Розглянуто значення GPS і CAN-систем у транспортному моніторингу, які забезпечують синхронізацію даних про переміщення та параметри роботи двигуна з показниками концентрацій CO<sub>2</sub>.

Запропонований метод моніторингу викидів базується на комплексному підході, що передбачає поєднання сенсорних технологій, аналітичного програмного забезпечення, хмарної обробки даних та механізмів автоматизованого управління. Його головна перевага – можливість виявлення аномалій, прогнозування наслідків викидів і формування ефективних стратегій зниження вуглецевого сліду в реальному часі. Така система не лише забезпечує контроль за дотриманням екологічних норм, а й служить інструментом стратегічного планування у сфері сталого розвитку.

Також, система за результатами моніторингу здатна сформувати низку рекомендацій. Наведемо приклад таких рекомендацій.

Розвиток громадського транспорту. Сприяння використанню електротранспорту та велосипедної інфраструктури може зменшити залежність від приватних автомобілів.

Впровадження систем моніторингу. Створення системи безперервного моніторингу викидів від транспорту дозволить отримувати актуальні дані для прийняття ефективних рішень.

Інформаційні кампанії. Підвищення обізнаності населення щодо впливу транспортних викидів на здоров'я та довкілля може стимулювати зміни в поведінці громадян.

Загалом, для ефективного управління викидами CO<sub>2</sub> від транспорту в Хмельницькому необхідно поєднувати технічні заходи з інформаційною підтримкою та розвитком інфраструктури.

## 4 КІБЕРФІЗИЧНА СИСТЕМА ВІДСТЕЖУВАННЯ ТА АНАЛІЗУ ВИКИДІВ ВУГЛЕЦЮ CO<sub>2</sub> У АТМОСФЕРУ

### 4.1 Вибір типу архітектури та зразків проектування

Для ефективної розробки програмного забезпечення кіберфізичної системи моніторингу та аналізу викидів CO<sub>2</sub> важливо обрати відповідний тип архітектури та зразки (патерни) проектування, які забезпечать масштабованість, надійність і можливість адаптації.

Найбільш доречною в цьому випадку є модульна мікросервісна архітектура, оскільки вона дозволяє розділити функціональність на окремі незалежні сервіси (наприклад, збір даних, попередня обробка, аналітика, візуалізація, прийняття рішень). Кожен з таких сервісів можна масштабувати, розгортати та оновлювати незалежно.

Розглянемо ключові зразки проектування, що можуть бути використані при проектуванні кіберфізичної системи відстежування та аналізу викидів CO<sub>2</sub>.

Перше, це Observer (спостерігач) для реакції на зміну стану сенсорних даних у реальному часі (наприклад, виявлення аномалій).

Друге, Adapter (адаптер) для інтеграції різноманітних типів сенсорів і систем збору даних (CAN-шина, GPS, IoT-пристрої).

Третє, Strategy (стратегія) для вибору методів аналізу залежно від джерела або типу викидів.

Четверте, Repository (репозиторій) для абстракції доступу до бази даних.

П'яте, Facade (фасад) для надання єдиного API інтерфейсу до складної системи аналізу й візуалізації.

Мікросервіси можуть спілкуватися через REST API або систему обміну повідомленнями (наприклад, MQTT або Kafka). Для гнучкої обробки даних доцільно використовувати stream processing (наприклад, Apache Flink або Spark Streaming), а також бази даних з підтримкою часових рядів (InfluxDB, TimescaleDB).

Візуалізація архітектурних шарів для кіберфізичної системи відстежування та аналізу викидів CO<sub>2</sub> у атмосферу представлена рисунку 4.1.

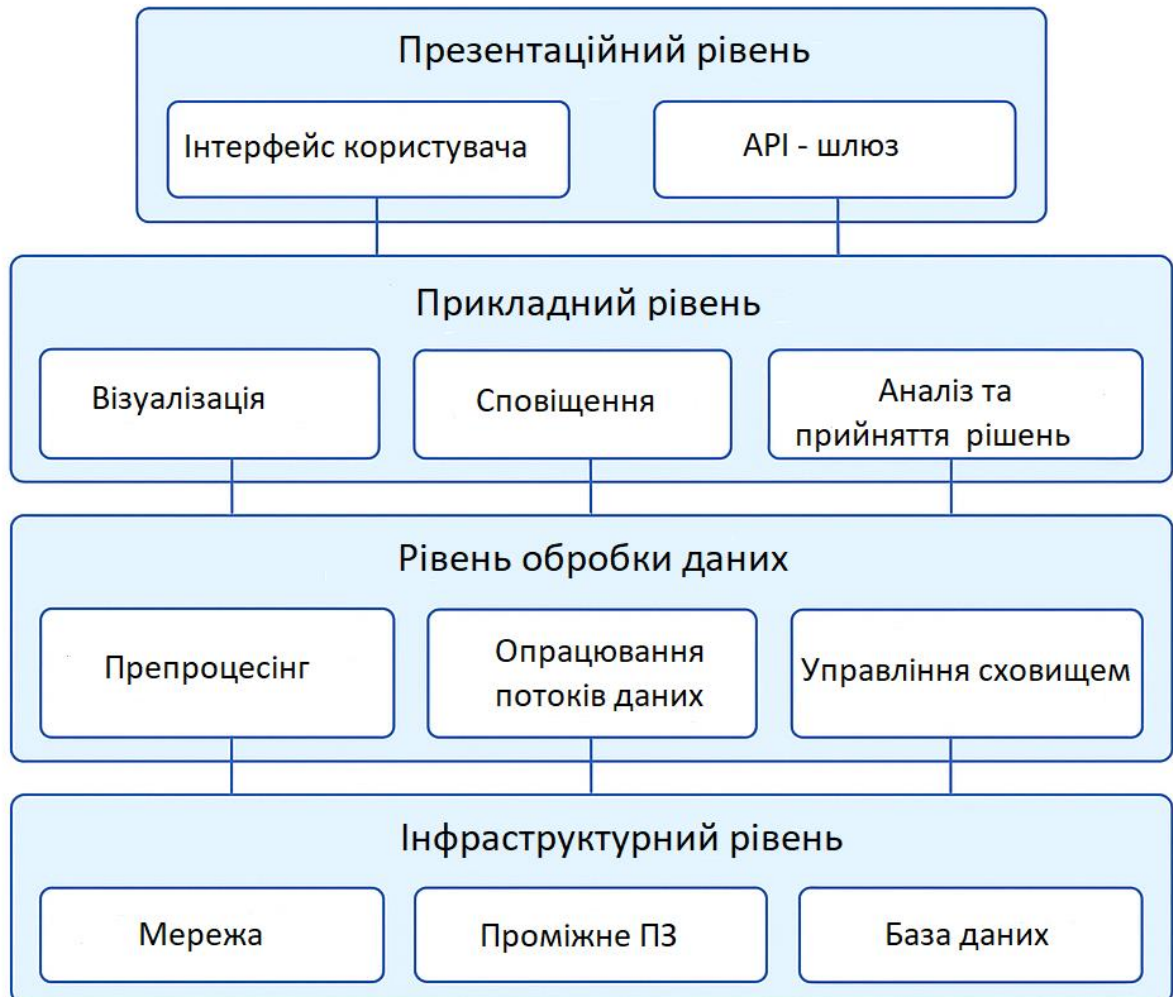


Рисунок 4.1 – Візуалізація архітектурних шарів для кіберфізичної системи відстежування та аналізу викидів CO<sub>2</sub> у атмосферу

Згідно з рисунком 4.1, який складається з чотирьох рівнів, архітектура програмного забезпечення кіберфізичної системи відстеження та аналізу викидів CO<sub>2</sub> виглядає наступним чином:

1. Презентаційний рівень, на якому встановлені всі датчики: CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, NO<sub>x</sub>, температури, тиску, витрати пального, а також GPS і CAN-шини. Сенсори безпосередньо взаємодіють з об'єктом моніторингу, збираючи точні дані про

параметри середовища та роботу технічних систем. Це найнижчий рівень, де відбувається первинний вимір і фіксація даних.

2. Прикладний рівень відповідає за прийом сигналів із сенсорів, їх первинну обробку (наприклад, фільтрацію або нормалізацію) і передачу до вищих рівнів системи. Застосовуються технології бездротового зв'язку – Wi-Fi, 5G, LoRaWAN — а також локальні контролери або шлюзи, що консолідують і маршрутизують інформацію до хмари або серверів.

3. Рівень обробки та аналізу даних, на цьому рівні розгортаються основні аналітичні функції. Тут використовуються програмні платформи для обробки великих обсягів даних, реалізуються алгоритми машинного навчання та штучного інтелекту, які дозволяють виявляти тренди, аномалії, прогнозувати рівні викидів і оцінювати ефективність вжитих заходів. Аналітика може працювати як у хмарі, так і на локальних потужностях.

4. Інфраструктурний рівень надає візуальні інтерфейси (панелі моніторингу, звіти, карти, графіки) для операторів, інженерів і керівників. Він також реалізує механізми прийняття рішень, які можуть бути як автоматичними (на основі аналітики), так і ручними. З цього рівня можна керувати роботою об'єктів, вносити зміни до технологічного процесу або приймати стратегічні рішення.

#### 4.2 Розробка архітектури програмного забезпечення кіберфізичної системи відстежування та аналізу викидів CO<sub>2</sub> у атмосферу

Розробка архітектури програмного забезпечення кіберфізичної системи для відстеження й аналізу викидів CO<sub>2</sub> є критично важливим етапом створення ефективного інструменту екологічного моніторингу. Така архітектура має бути масштабованою, адаптивною, надійною та здатною інтегруватися з фізичними компонентами системи, зокрема сенсорами, пристроями збору даних, транспортними засобами й енергетичними установками. У розробці програмного забезпечення враховуються специфічні вимоги до обробки великих обсягів

гетерогенних даних у реальному часі, забезпечення кібербезпеки, безперебійного функціонування та доступності для різних типів користувачів.

Архітектура програмного забезпечення КФС зазвичай будується за модульним принципом і охоплює кілька ключових компонентів.

Модуль збору даних забезпечує інтеграцію з апаратними сенсорами, GPS-навігацією, CAN-шинами, супутниками, дронами та іншими джерелами даних. Підтримує стандартизовані протоколи зв'язку та здатен працювати в умовах поганої або нестабільної мережі.

Модуль попередньої обробки даних виконує фільтрацію, агрегацію та базову нормалізацію вхідних даних, а також застосовує алгоритми виявлення помилок та аномалій.

Аналітичний модуль є ключовим інструментом системи, який забезпечує глибоку аналітику за допомогою алгоритмів машинного навчання, предиктивного моделювання та систем підтримки прийняття рішень. Тут відбувається прогнозування викидів, моделювання сценаріїв, оцінка ефективності екологічних заходів.

Модуль візуалізації надає графічні панелі управління, інтерактивні карти, часові діаграми, таблиці та попереджувальні повідомлення. Забезпечує зручний доступ до результатів аналізу для операторів, інженерів, екологів і регуляторних органів.

Хмарна інфраструктура забезпечує зберігання, резервування та масштабовану обробку даних, а також синхронізацію між локальними обчислювальними пристроями й центральною системою.

Модуль безпеки – відповідає за автентифікацію користувачів, шифрування даних, захист від вторгнень та ведення журналів доступу.

Програмне забезпечення також має підтримувати API для інтеграції з зовнішніми системами – наприклад, платформами міського управління, державними базами даних про викиди або корпоративними системами звітності.

Така архітектура дозволяє забезпечити безперервний моніторинг, швидке реагування на зміну ситуації та стратегічне планування заходів із декарбонізації.

#### 4.2.1 Діаграма варіантів використання для програмного забезпечення

Діаграма варіантів використання у контексті програмного забезпечення кіберфізичної системи для відстеження та аналізу викидів CO<sub>2</sub> є важливим інструментом, який демонструє взаємодію між користувачами (акторами) системи та основними функціональними можливостями (варіантами використання), що реалізуються в межах цієї системи.

У теоретичному плані ця діаграма будується з метою:

- визначення функціональних вимог до системи – описує, що система повинна робити з точки зору кінцевого користувача;
- моделювання взаємодії між користувачами та системою – включає як внутрішніх операторів (інженери, аналітики), так і зовнішні системи (наприклад, державні служби чи екологічні платформи);
- планування та структурування архітектури показує, які функції є базовими, які додатковими, та які можуть мати розширення або умови виконання.

В таблиці 4.1 представлені основні актори, які використовуються в діаграмах використання кіберфізичної системи відстежування та аналізу викидів CO<sub>2</sub>.

Варіанти використання, які використовуються при проектуванні КФС відстежування та моніторингу викидів CO<sub>2</sub>:

- збір даних з сенсорів;
- перевірка якості та цілісності даних;
- збереження даних у базі;
- обробка та аналіз (виявлення перевищень, трендів);
- генерація звітів;
- візуалізація даних;
- прогнозування рівнів викидів;
- надсилання сповіщень/повідомлень;
- інтеграція з зовнішніми API або платформами;
- автоматичне управління параметрами в реальному часі.

Таблиця 4.1 – Основні актори діаграми використання

Актор	Опис ролі
Оператор системи	Відповідає за моніторинг, перегляд вхідних даних, запуск процедур аналізу
Аналітик	Аналізує дані, формує прогнози, будує тренди та оцінює сценарії розвитку
Сенсорний пристрій	Автоматично генерує вимірювальні дані та передає їх до системи
Зовнішній сервіс	Державні чи сторонні системи, з якими обмінюється даними.
Система управління об'єктом	Автоматично регулює параметри

Такі діаграми допомагає структурувати логіку взаємодій і визначити, які частини системи є найбільш важливими з точки зору користувача та які компоненти потребують подальшого проектування. Приклад діаграми варіантів використання для моніторингу рівня CO<sub>2</sub> у реальному часі представлений на рисунку 4.2.

Діаграма варіантів використання для кіберфізичної системи відстежування та аналізу викидів CO<sub>2</sub> ілюструє взаємодію між ключовими користувачами (акторами) та функціональними можливостями системи (рисунком 4.4). Основними акторами є оператор системи, аналітик, сенсорний пристрій, і система управління об'єктом. Оператор має змогу ініціювати процеси моніторингу, переглядати поточні та історичні дані, а також запускати аналітичні функції для виявлення відхилень або перевищень допустимих рівнів. Аналітик використовує систему для генерації звітів, аналізу довгострокових трендів та моделювання можливих сценаріїв змін.

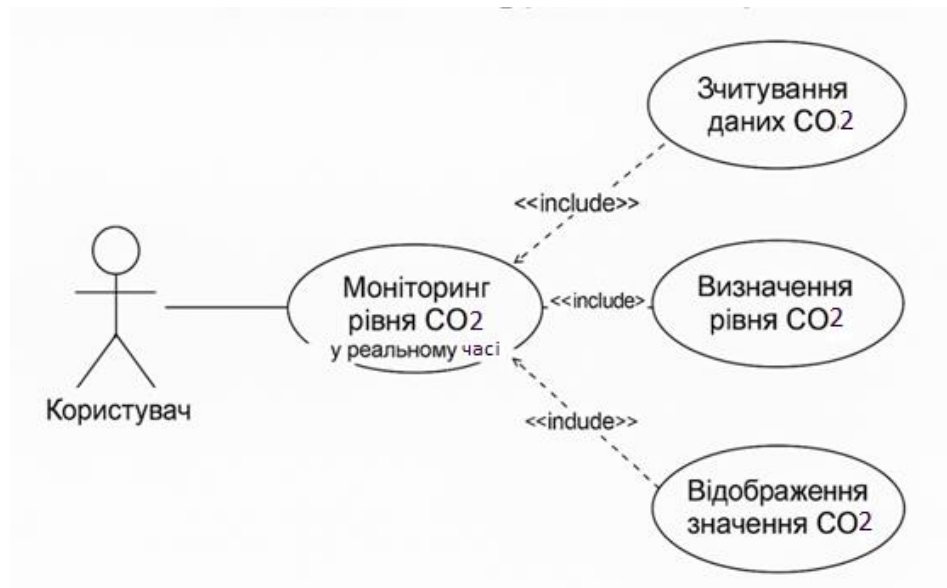


Рисунок 4.2 – Діаграма варіантів використання моніторингу рівня CO<sub>2</sub> у реальному часі

Сенсорний пристрій автоматично передає дані про концентрацію CO<sub>2</sub> до центральної системи, де вони обробляються та зберігаються.

Зовнішні сервіси, зокрема державні реєстри викидів чи метеорологічні системи, надають додаткові дані для комплексного аналізу.

Система управління об'єктом реагує на сигнали системи, наприклад, змінює параметри роботи обладнання для зменшення шкідливих викидів.

Така архітектура дозволяє забезпечити безперервний моніторинг, аналітичну гнучкість і високий рівень автоматизації в боротьбі з викидами парникових газів.

Діаграма варіантів використання збору даних з сенсорів представлена на рисунку 4.3.



Рисунок 4.3 – Діаграма варіантів використання збору даних з сенсорів



Рисунок 4.4 – Діаграма варіантів використання функціонування кіберфізичної системи відстежування та аналізу викидів CO<sub>2</sub>

#### 4.2.2 Діаграма класів програмного забезпечення

Діаграма класів кіберфізичної системи відстеження та аналізу викидів CO<sub>2</sub> ілюструє основну структуру об'єктно-орієнтованої моделі, яка включає ключові компоненти системи (рисунок 4.5). У центрі архітектури програмного забезпечення для контролю викидів транспорту в місті Хмельницькому знаходиться головний координаційний клас – EmissionMonitoringSystem. Саме він відповідає за організацію взаємодії між усіма підсистемами: сенсорними пристроями, модулями збору і зберігання даних, аналітичним ядром та інтерфейсом користувача. Цей клас виконує керівну роль – приймає сигнали від апаратного забезпечення, ініціює обробку інформації, здійснює моніторинг стану підсистем та керує логікою роботи в режимі реального часу.

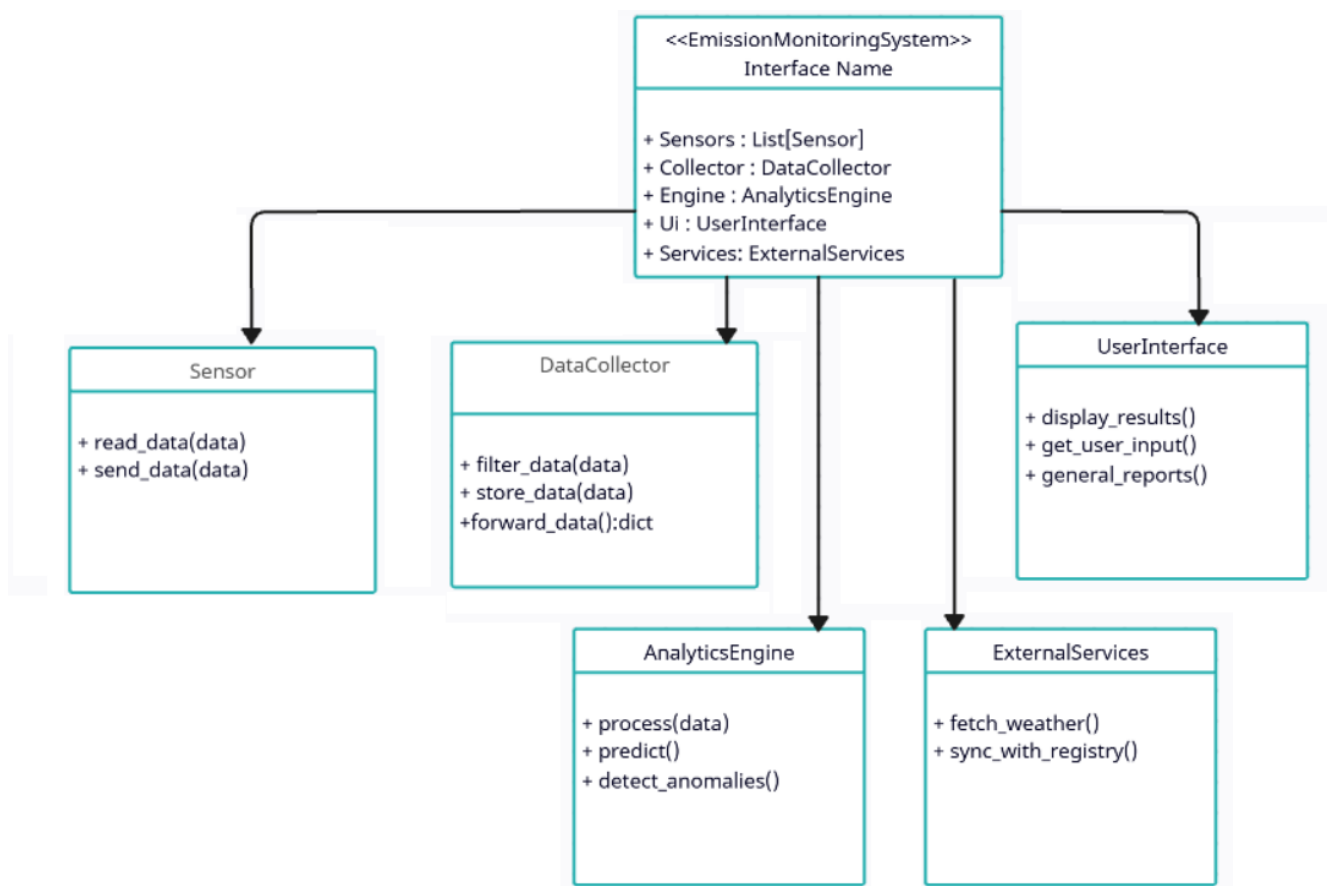


Рисунок 4.5 – Діаграма класів програмного забезпечення

Одним із ключових компонентів є клас `Sensor`, який реалізується як узагальнений інтерфейс для різних типів сенсорів – включно з вимірювачами вмісту CO<sub>2</sub>, температури, вологості, атмосферного тиску, а також GPS-модулями на транспортних засобах. Кожен екземпляр `Sensor` здатен ініціювати зчитування фізичних параметрів навколишнього середовища або технічного стану транспорту, перетворюючи ці сигнали у цифрові дані, придатні для подальшої обробки. Зібрані значення передаються у спеціалізований модуль – `DataCollector`. `DataCollector` виступає як буфер та фільтр, що виконує первинну обробку даних: видалення шумів, перевірку цілісності записів, часову синхронізацію та агрегацію у пакетах. Його завдання – зберегти якісні дані у внутрішній базі системи або проміжному сховищі, а далі передати їх до центрального аналітичного модуля – `AnalyticsEngine`.

У `AnalyticsEngine` відбувається найскладніша частина роботи. Цей компонент використовує різноманітні статистичні методи, а також алгоритми машинного навчання, наприклад, нейронні мережі, дерева рішень або моделі часових рядів – для виявлення трендів у зміні рівня викидів, прогнозування пікових навантажень, оцінки ймовірності перевищення нормативів у конкретних районах чи часових інтервалах. Аналітичне ядро також відповідальне за виявлення аномалій, що можуть свідчити про несправність сенсорів, збої у транспортній системі чи неочікувані погодні впливи.

Результати аналізу передаються до класу `UserInterface`, який забезпечує комунікацію між системою і кінцевим користувачем – оператором муніципальної служби, аналітиком або відповідальним екологом. Інтерфейс дозволяє переглядати результати у зрозумілому вигляді: інтерактивні графіки, звітні таблиці, теплові мапи міста, а також автоматичні повідомлення та сповіщення про критичні значення. Через `UserInterface` користувач може змінювати налаштування, запитувати звіти, керувати фільтрами відображення або експортувати дані у зовнішні формати.

Окрему роль у структурі системи відіграє клас `ExternalServices`, який відповідає за інтеграцію з зовнішніми ресурсами. Це можуть бути державні

екологічні реєстри, погодні API (наприклад, OpenWeather), муніципальні бази даних про маршрути транспорту, а також сервіси супутникового моніторингу або історичні архіви. Завдяки цьому модулю система отримує додаткові контекстні дані, що дозволяє проводити більш глибокий та багатофакторний аналіз, наприклад, кореляцію між погодними умовами та рівнем викидів у різні пори року або дні тижня.

Завдяки такій архітектурі, де чітко розділено обов'язки між класами, система забезпечує високу масштабованість (легке додавання нових типів сенсорів або алгоритмів), розширюваність (можливість інтеграції нових зовнішніх джерел даних), а також надійність при роботі в умовах великих обсягів інформації, що надходить у режимі реального часу.

#### 4.2.3 Діаграма станів програмного забезпечення

Розглянемо діаграму станів програмного забезпечення КФС відстежування та аналізу викидів CO<sub>2</sub> в атмосферу (рисунок 4.6). Діаграма станів програмного забезпечення – це графічне представлення усіх можливих станів об'єкта чи системи та подій, які спричиняють переходи між цими станами. Діаграма станів потрібна для того, щоб візуалізувати поведінку системи.

Початковий стан (Ініціалізація) завантажує конфігурації системи, встановлює з'єднання з базами даних та сенсорними пристроями (GPS/IoT на транспорті), перевіряє справності каналів передачі даних.

Перехід у стан «Очікування даних» передбачає очікування даних, переводить систему в пасивний режим, яка очікує надходження даних з транспортних засобів. Може бути фонове оновлення карт та мапи міста.

Далі отриманий пакет даних переходить у стан «Обробка даних». При цьому відбувається прийом GPS-координат, швидкості руху, типу транспортного засобу, витрати пального.

Далі програмне забезпечення веде розрахунок викидів CO<sub>2</sub> згідно з формулами та коефіцієнтами (наприклад, відповідно до IPCC або європейських

стандартів). Також ведеться підрахунок інтегрального навантаження по маршрутах.

У разі успішної обробки, програма переходить у стан «Аналіз та зберігання», де відбувається збереження оброблених даних у базу, а саме оновлення графіків, теплових карт, показників на дашборді. У разі перевищення нормативів генеруються сповіщення.

Далі відбувається перехід у стан «Очікування запиту користувача» або циклічно повернення до «Очікування даних». Тут користувач може переглянути аналітику (по районах, маршрутах, типах ТЗ), експортувати звіти, налаштувати параметри, запустити прогноз або аналіз сценаріїв.

Після операцій користувача програма переходить у стан «Візуалізація» або «Формування звіту». Будує графіки, діаграми, теплові карти та PDF-звіти. Результат надсилається на пошту або у зовнішні системи (наприклад, муніципальні або екологічні портали).

Якщо при обробці виникає помилка даних, то система переходить у стан «Логування помилок». Стан логування помилок передбачає запис інформації про некоректні дані, відмови зв'язку, невідповідність форматів. Цей стан повідомляє адміністраторів та переходить у стан «Очікування даних».

Далі, за потреби, відбувається завершення/вимкнення, збереження стану системи, відключення від пристрою та логування завершення сесії.

Діаграма показує, як саме програмне забезпечення реагує на різні події, що змінюють його внутрішній стан. Наприклад, у системі моніторингу викидів – перехід від «Очікування даних» до «Обробка даних» при надходженні сенсорної інформації.

Для аналізу логіки та життєвого циклу вона дозволяє чітко зрозуміти життєвий цикл об'єкта чи модуля – від ініціалізації до завершення, включаючи всі проміжні стани.



Рисунок 4.6 – Діаграма станів програмного забезпечення

Це важливо для проектування систем із високими вимогами до надійності. Можливість виявлення помилок на ранньому етапі. Можна вчасно побачити нелогічні переходи або відсутність обробки певних станів (наприклад, не передбачено, що робити у разі збоїв). Використовуючи таку діаграму можна для покращення комунікації між розробниками і замовниками. Діаграма легко читається і допомагає узгодити функціональну поведінку без складної технічної мови. Вона слугує основою для програмної реалізації: кожен стан – це частина коду, а кожен перехід – умова в логіці або обробник подій. Дозволяє скласти

повний набір сценаріїв для тестування: чи система правильно переходить у відповідний стан при кожному сценарії.

У контексті КФС для моніторингу викидів транспорту діаграма станів допомагає зрозуміти, як система:

- переходить від ініціалізації до збору даних;
- як вона обробляє, аналізує, та зберігає інформацію;
- як реагує на помилки чи запити користувача;
- і в якому стані завершує роботу.

#### 4.3 Інтерфейс програмного забезпечення кіберфізичної системи відстежування та аналізу викидів CO<sub>2</sub> у атмосферу

Інтерфейс програмного забезпечення кіберфізичної системи для відстежування та аналізу викидів CO<sub>2</sub> у атмосферу є ключовим елементом взаємодії між користувачем та функціональними модулями системи.

Його мета – забезпечити доступ до даних у реальному часі, відображення результатів аналітики та керування параметрами моніторингу у зручному, інтуїтивному форматі. Програмне забезпечення об'єднує апаратну частину (датчики) з цифровим ядром (аналітичні модулі, бази даних, зовнішні сервіси), створюючи єдине інформаційне середовище.

Програмне забезпечення кіберфізичної системи моніторингу викидів CO<sub>2</sub> виконує роль центрального інтеграційного компонента, який об'єднує апаратну частину – мережу сенсорів, розміщених на транспортних засобах або в міських зонах із цифровим ядром, що реалізоване як набір взаємопов'язаних програмних модулів.

З технічної точки зору, програмне забезпечення включає кілька рівнів:

1. Системне програмне забезпечення, яке включає драйвери для підключення сенсорів CO<sub>2</sub>, температури, вологості, GPS; модулі збору телеметрії з пристроїв через протоколи MQTT, HTTP або LoRaWAN.

2. Серверна частина (backend), яка реалізована на основі хмарної або локальної інфраструктури (наприклад, з використанням Python, Node.js чи Java), включає модуль DataCollector для збирання та збереження даних, аналітичний модуль AnalyticsEngine, що працює з бібліотеками на кшталт TensorFlow, scikit-learn, Pandas.

3. База даних (БД) є централізованим сховищем даних (наприклад, PostgreSQL, InfluxDB або MongoDB), куди зберігаються як «сирі» сенсорні дані, так і результати аналітики. Додатково використовуються кешуючі або часові БД для оптимізації обробки потоків даних у реальному часі.

4. Модуль зовнішніх сервісів (ExternalServices) забезпечує інтеграцію з API відкритих даних, таких як погодні сервіси (OpenWeatherMap), муніципальні транспортні реєстри, карти забруднення, а також можливість підключення до екологічних систем контролю державного рівня (через REST або SOAP API).

5. Інтерфейсом користувача (UserInterface) може бути веб- або десктоп-додатком, розробленим на основі сучасних фреймворків (React, Vue.js, або Qt), що забезпечує візуалізацію даних, зручний доступ до функцій аналітики, формування звітів, налаштування параметрів моніторингу. Через інтерфейс користувач може обирати часові діапазони, фільтрувати дані за районами міста, порівнювати показники викидів у різні дні або сезони.

Для успішного функціонування кіберфізичної системи необхідно описати основні функції програмного забезпечення.

У таблиці 4.2 наведено короткий опис основних функцій програмного забезпечення, реалізованих у межах цієї системи.

Програмне забезпечення КФС реалізує функцію збору даних із великої кількості датчиків, розташованих у місті (на транспорті, на стаціонарних станціях, на перехрестях тощо).

Ці датчики зчитують рівень концентрації CO<sub>2</sub>, а також супутні параметри довкілля – температуру, вологість, атмосферний тиск, швидкість вітру, що мають вплив на розповсюдження викидів.

Таблиця 4.2 – Опис основних функцій ПЗ

№		Опис функції	Користувач / модуль
1	Збір даних з датчиків	Отримання даних з CO <sub>2</sub> -датчиків, а також температури, вологості, тиску	DataCollector, Sensor
2	Фільтрація та перевірка	Первинна обробка даних: видалення шумів, перевірка достовірності, синхронізація за часом	DataCollector
3	Збереження даних	Архівація вимірювань у внутрішнє сховище для подальшої обробки	DataCollector, Database
4	Аналітична обробка	Аналіз тенденцій, виявлення аномалій, прогнозування екологічної ситуації	AnalyticsEngine
5	Візуалізація результатів	Побудова графіків, теплових мап, табличних звітів, повідомлень про перевищення нормативів	UserInterface
6	Інтерактивна панель	Керування параметрами моніторингу, налаштування фільтрів, генерація запитів	UserInterface
7	Інтеграція з зовнішніми джерелами	Обмін інформацією з API погоди, транспортними службами, державними реєстрами	ExternalServices
8	Логування та повідомлення	Запис помилок, подій, критичних значень, сповіщення користувача	LoggingSystem, UserInterface
9	Експорт даних	Формування звітів у форматах CSV, PDF, інтеграція з іншими системами	UserInterface, ExportModule

Зібрані показники надходять у центральний модуль збору – *DataCollector*, який виконує початкову обробку інформації. Він фільтрує помилкові або неповні дані, синхронізує їх за часовими мітками та зберігає у проміжному сховищі.

Далі активується аналітична функція системи, яка реалізується в модулі *AnalyticsEngine*. Тут відбувається глибока обробка даних із застосуванням методів математичного моделювання та машинного навчання. Алгоритми аналізують поведінку викидів у часі та просторі, виявляють відхилення від норми, потенційно небезпечні тренди, спрогнозовані зони підвищеного забруднення. Наприклад, система може попередити про очікуване перевищення ГДК (гранично допустимої концентрації) CO<sub>2</sub> в центрі міста у години пік.

Паралельно функціонує інтерфейс користувача, який реалізує доступ до всієї системи через зручну інтерактивну панель. Тут оператор або аналітик може переглядати графіки, теплові карти, діаграми, а також обирати часові діапазони, масштабувати райони міста, формувати звіти. Інтерфейс також дозволяє налаштувати параметри моніторингу, наприклад, визначити критичні рівні CO<sub>2</sub>, при досягненні яких система надсилатиме повідомлення.

Окремо варто виділити функцію інтеграції із зовнішніми сервісами, наприклад, з погодними API, базами даних транспорту, державними еко-реєстрами. Це дозволяє системі проводити багатофакторний аналіз: наприклад, співвідносити рівень викидів з типом палива транспорту, інтенсивністю руху чи зміною атмосферного тиску. Така інтеграція значно підвищує точність моделей прогнозування та дає змогу приймати зважені управлінські рішення.

Ще однією важливою складовою є функція логування та сповіщення, що забезпечує ведення журналів усіх подій від системних помилок до збереження щоденних звітів. Коли рівень забруднення перевищує встановлений поріг, система генерує повідомлення, які можуть автоматично надсилатися відповідальним службам. Останнім етапом є експорт даних — ця функція дозволяє формувати результати у вигляді файлів (CSV, PDF, Excel) або забезпечувати API-доступ для інших інформаційних систем міста, з якими КФС може бути інтегрована.

#### 4.4 Приклади роботи кіберфізичної системи відстежування та аналізу викидів CO<sub>2</sub>

Розглянемо як функціонує запропонована система на реальних даних. Загальне розташування необхідних засобів вимірювання виглядає як на рисунку 4.7. Було розглянуто два варіанти розташування сенсорів для вимірювання CO<sub>2</sub>, це датчики CO<sub>2</sub> на основі NDIR-технології, розміщені у різних точках міста та мобільні платформи – один з датчиків закріплюється на дроні або транспортному засобі. Враховуючи ціну, вважаємо, що використовувати мобільні платформи недоречно, тому використовуємо стаціонарні сенсори.

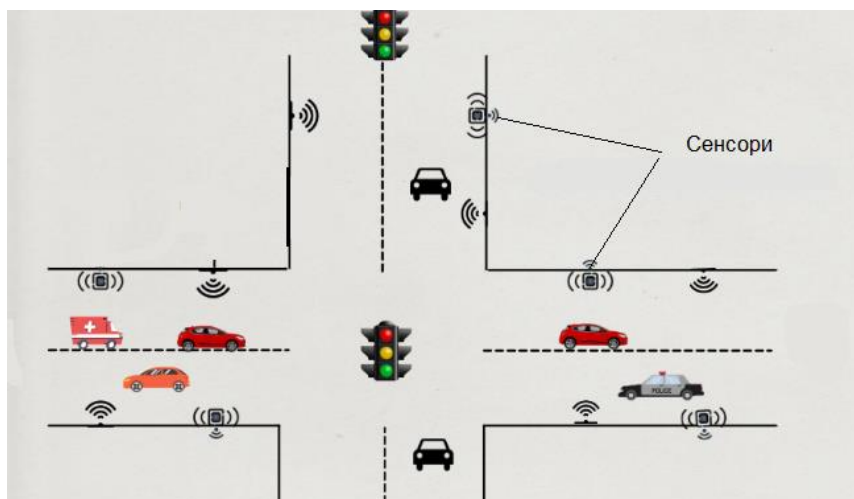


Рисунок 4.7 – Розташування засобів вимірювання на перехресті міста

Серверна частина, яка буде використовуватись може бути або Raspberry Pi або хмарне рішення), куди надсилаються дані в реальному часі. Аналітична програма для обробки та візуалізації даних на базі Python, ThingsBoard або Grafana. Для експерименту було обрано 3 контрольні зони: Центр міста (інтенсивний трафік), Житловий масив (помірна активність) та Зелена зона (контрольна точка).

Обладнання та платформи, які використовувались:

- датчики CO<sub>2</sub>: MH-Z19B (на базі NDIR);
- мікроконтролер: ESP8266 (NodeMCU);

- хмарна платформа: ThingsBoard;
- додаткова аналітика: Python, pandas, matplotlib.

В таблиці 4.3 наведений сценарій експериментального моніторингу.

Таблиця 4.3 – Сценарій моніторингу

Зона	Тип зони	GPS-координати	Час моніторингу
Центральна площа	Інтенсивний рух	49.4225, 26.9861	08:00–20:00
Озерна	Житлова зона	49.4173, 27.0062	08:00–20:00
Парк ім.Чекмана	Зелена зона	49.4269, 26.9737	08:00–20:00

В таблиці 4.4 показаний розподіл зібраних даних.

Таблиця 4.4 – Зібрані дані (CO<sub>2</sub>, ppm)

Час	Центральна площа	Озерна	Парк ім.Чекмана
08:00	560	510	430
10:00	610	520	440
12:00	680	540	450
14:00	720	560	470
16:00	750	580	480
18:00	700	550	470
20:00	640	520	460

Отже, як результат (рисунок 4.8), можна відмітити, що найвищий рівень CO<sub>2</sub> зафіксовано в центрі міста о 16:00 — 750 ppm, що перевищує допустиму норму (600 ppm).

У житловій зоні рівень стабільно нижчий, але досягає 580 ppm у піковий час. У зеленій зоні концентрація CO<sub>2</sub> залишається в межах норми (до 480 ppm).

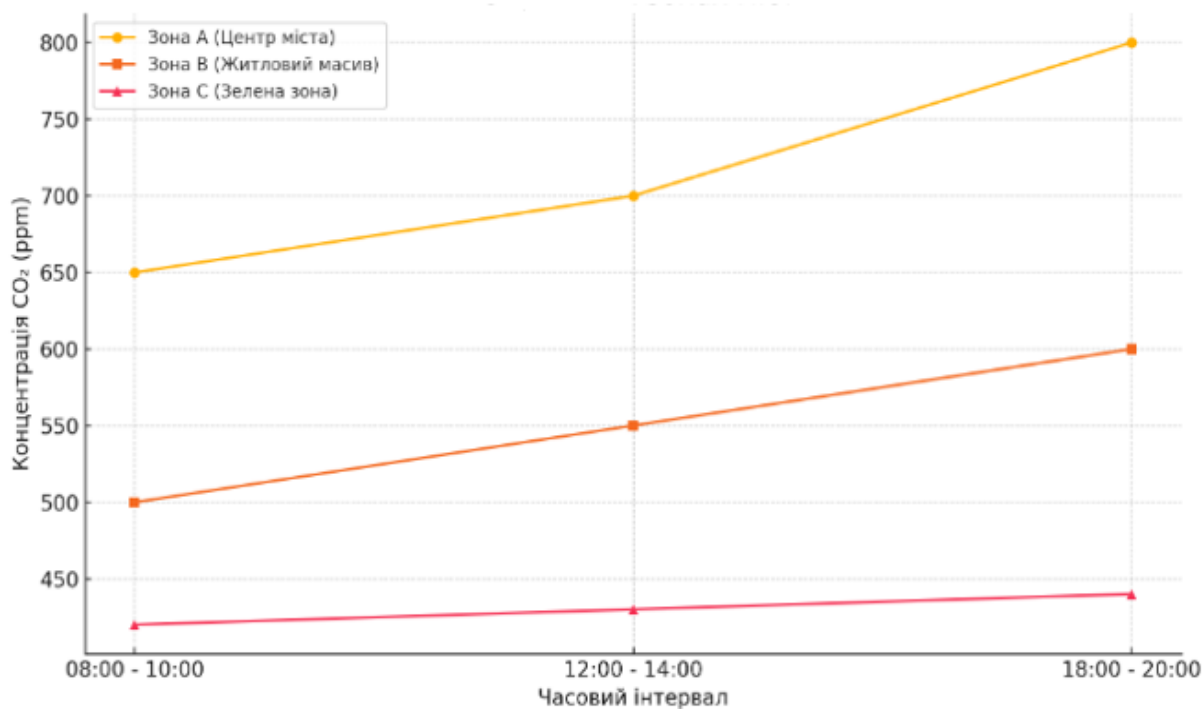


Рисунок 4.8 – Результати моніторингу викидів CO<sub>2</sub> в різних районах міста

Статистика даних моніторингу викидів CO<sub>2</sub> від транспорту по місяцях є надзвичайно важливою складовою екологічного аналізу та управління якістю повітря в міських умовах. Вона дозволяє проводити глибокий аналіз сезонної, часової та просторової динаміки викидів, виявляти тенденції, а також формувати ефективні рішення для зменшення впливу транспорту на навколишнє середовище. Передусім, місячна статистика дозволяє фіксувати сезонні коливання, які залежать від кліматичних умов, інтенсивності використання приватного й громадського транспорту, святкових чи канікулярних періодів. Наприклад, в зимовий період можуть спостерігатися вищі показники викидів через більшу кількість автотранспорту на коротких дистанціях, прогрів двигунів, або погіршену дисперсію забруднень через погодні умови (інверсії, відсутність вітру). Влітку ж CO<sub>2</sub>-викиди можуть бути меншими, проте збільшення трафіку в туристичних зонах здатне дати локальні сплески. Збір таких даних також необхідний для виявлення відхилень або аномалій у роботі транспортної системи, які можуть вказувати на зростання кількості старих або технічно несправних автомобілів. Це допомагає комунальним і державним

службам приймати обґрунтовані рішення щодо екологічної сертифікації транспорту, обмеження в'їзду в центр міста, чи створення екозон.

В таблиці 4.5 наведені дані для різних місяців.

Таблиця 4.5 – Статистика даних моніторингу викидів CO<sub>2</sub>

Дата	Район	Середнє CO <sub>2</sub> (ppm)
10.12	Центральна площа	700
	Озерна	560
	Парк ім.Чекмана	470
10.01	Центральна площа	680
	Озерна	550
	Парк ім.Чекмана	460
10.02	Центральна площа	640
	Озерна	520
	Парк ім.Чекмана	430
10.03	Центральна площа	642
	Озерна	520
	Парк ім.Чекмана	420
10.04	Центральна площа	600
	Озерна	510
	Парк ім.Чекмана	400

Розглянемо та підсумуємо тренд концентрації CO<sub>2</sub>. Усі райони демонструють зниження рівня CO<sub>2</sub> з лютого до квітня, що може бути пов'язано зі зменшенням опалювального сезону, збільшенням зеленої маси (у квітні), покращенням погодних умов.

Найвищий рівень традиційно фіксується у центральній частині, де інтенсивний трафік. Найчистіше повітря у парку ім.Чекмана.

Місячна статистика викидів CO<sub>2</sub> є базою для побудови довгострокових прогнозів, трендів та оцінки ефективності заходів з декарбонізації.

Наприклад, після впровадження певної політики (заборона дизельного транспорту, перехід на електробуси) саме такі дані покажуть, чи є позитивний екологічний ефект.

Важливо також, що регулярна звітність і доступ до статистики сприяє прозорості управлінських рішень і підвищує рівень обізнаності населення щодо стану довкілля, стимулюючи відповідальну поведінку, слугує джерелом даних для досліджень, моделювання міського середовища та розробки інноваційних технологій у сфері сталого транспорту (рисунок 4.9).

Помітне поступове зниження рівня викидів від грудня до квітня, що може свідчити про сезонні зміни або ефективність заходів із зниження викидів.

Розглянемо та підсумуємо тренд концентрації CO<sub>2</sub>. Центральна площа – найвищі показники через інтенсивний трафік і опалення взимку. Озерна – стабільний рівень забруднення, з поступовим спадом. Парк Чекмана – найнижчі показники завдяки великій кількості зелених насаджень.

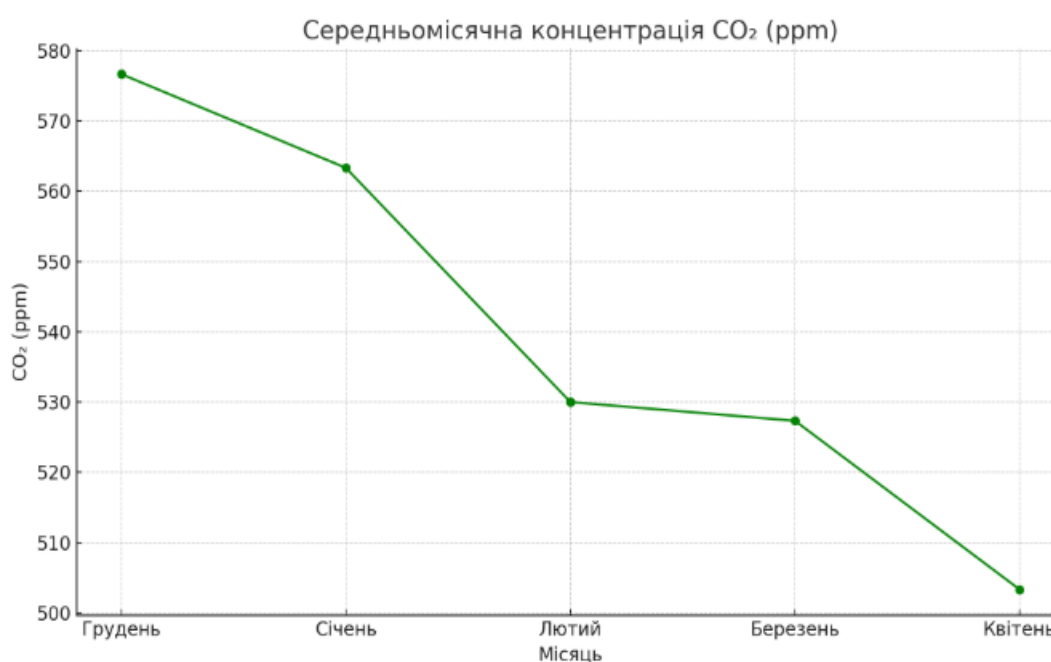


Рисунок 4.9 – Середньомісячна концентрація CO<sub>2</sub> (ppm)

На рисунках 4.10 – 4.12 наведені результати роботи системи у вигляді графіків.

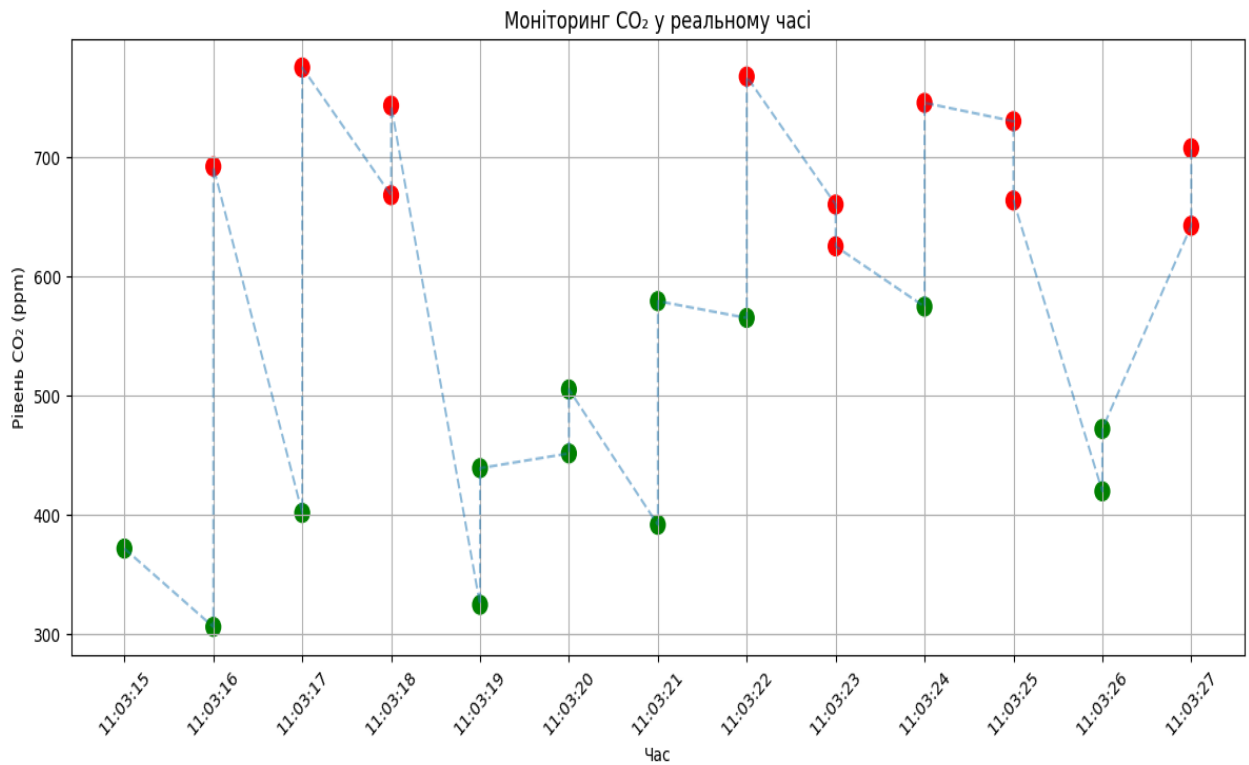


Рисунок 4.10 – Результати моніторингу системою у реальному часі

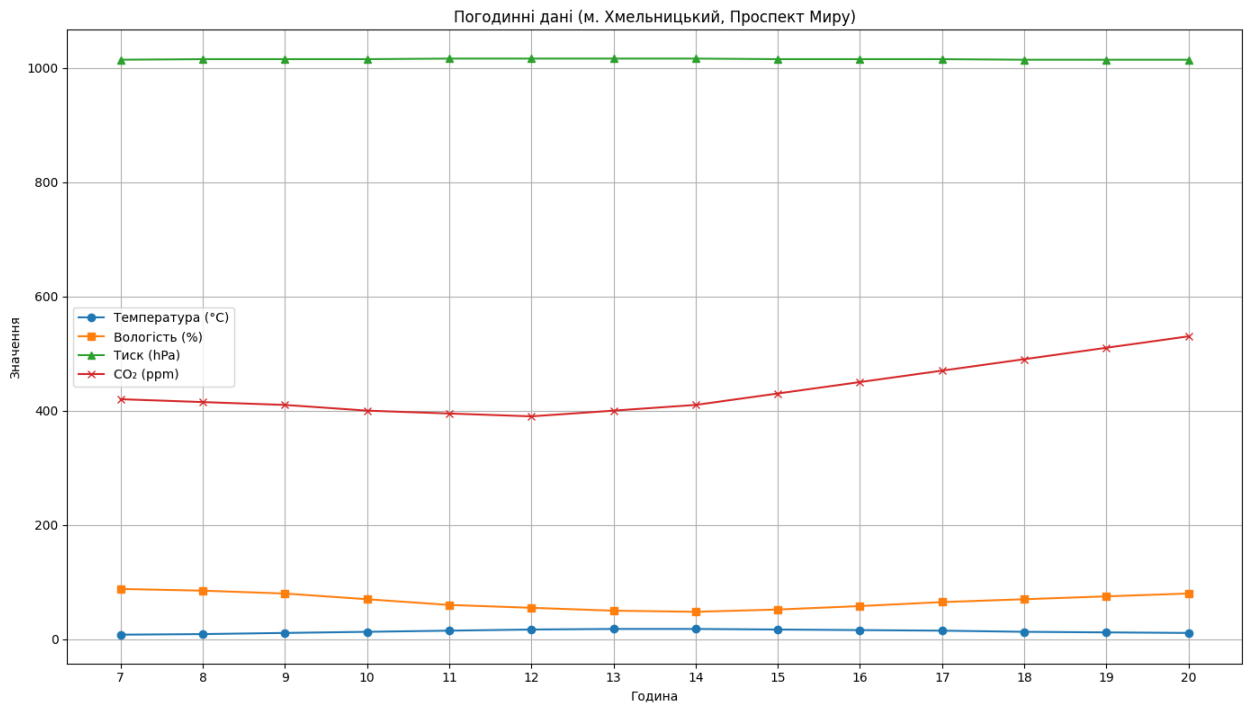


Рисунок 4.11 – Погодинні дані системи моніторингу в реальному часі

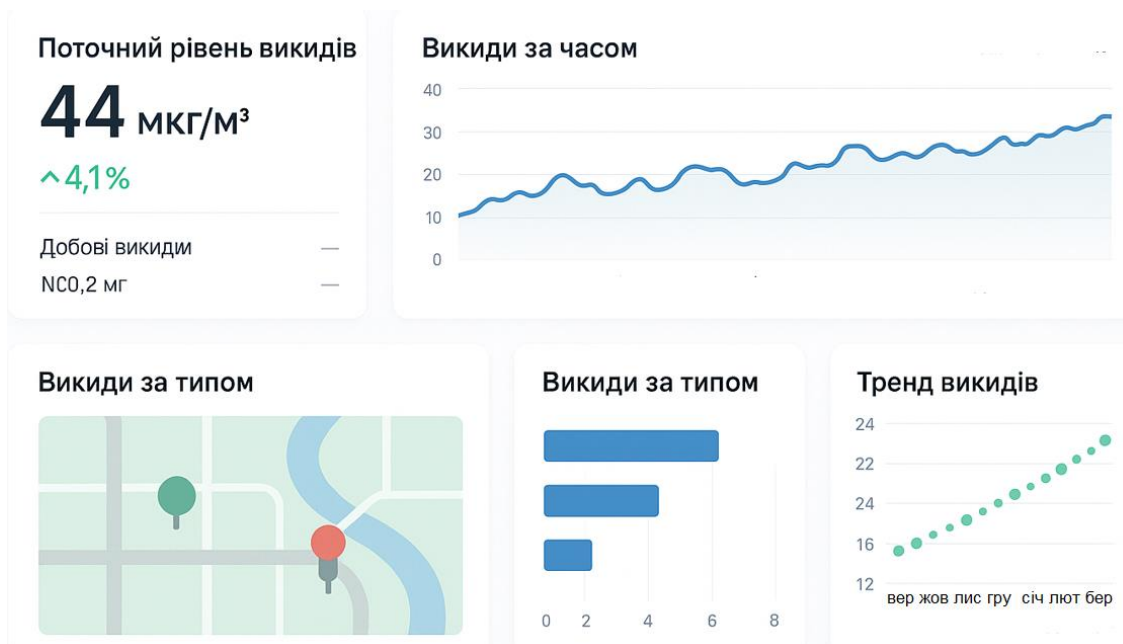


Рисунок 4.12 – Результати статистичних даних системи відстежування та аналізу CO<sub>2</sub> викидів у атмосферу

Результати експерименту з моніторингу концентрації CO<sub>2</sub> у різних типах міських середовищ (центр, житлова зона, зелена зона) дозволили виявити чітку залежність між антропогенним навантаженням та рівнем викидів. Найвищі показники CO<sub>2</sub> зафіксовано у центральній частині міста в години пік, що пов'язано з інтенсивним дорожнім рухом, високою щільністю забудови та обмеженою циркуляцією повітря. Це вказує на серйозні екологічні ризики для мешканців таких зон, а також підтверджує необхідність системного управління викидами.

Житлові зони демонструють помірний рівень CO<sub>2</sub> з підвищенням у вечірні години, що свідчить про вплив побутової активності та інтенсивності руху транспорту у другій половині дня. Зелена зона (парк) виступає своєрідним «екологічним буфером» – рівень CO<sub>2</sub> у ній значно нижчий, стабільний і не перевищує допустимих норм, що підтверджує важливість зелених насаджень для зниження концентрації шкідливих газів у повітрі.

У контексті кіберфізичної системи відстеження та аналізу викидів CO<sub>2</sub>, експеримент продемонстрував ефективність архітектурного підходу, що включає

багаторівневу обробку даних – від сенсорного збору до хмарної аналітики. Інтеграція геолокаційних даних (GPS), телеметрії (CAN), атмосферних параметрів та хмарної аналітики дозволяє оперативно і точно ідентифікувати зони перевищення норм, корелювати дані з іншими екологічними індикаторами, а також забезпечити адаптивне управління навантаженням на довкілля.

Таким чином, розроблена кіберфізична система відстежування та аналізу викидів CO<sub>2</sub> у атмосферу є потужним інструментом в реалізації екологічної політики, підтримки стратегії декарбонізації та підвищення сталості урбанізованих територій. Її використання дозволяє не лише проводити моніторинг, а й прогнозувати ситуації, надавати рекомендації щодо зменшення викидів та реагувати в реальному часі.

#### 4.5 Висновки

У четвертому розділі кваліфікаційної роботи вперше запропоновано архітектуру кіберфізичної системи моніторингу навколишнього середовища з акцентом на відстеження та аналіз викидів CO<sub>2</sub>, з використанням геолокаційних даних, багаторівневих сенсорних платформ та програмного забезпечення для обробки й візуалізації даних у режимі реального часу. На відміну від традиційних методів, розроблена система дозволяє безперервно фіксувати концентрацію CO<sub>2</sub> у різних міських зонах, зокрема в районах інтенсивного транспортного руху, житлових масивах і зелених зонах, що забезпечує високоточну локалізацію джерел надлишкових викидів.

Завдяки інтеграції даних з GPS, CAN-шини, а також додаткових сенсорів температури, тиску, та витрати пального, система створює детальну екологічну картину функціонування транспорту в реальному часі. Врахування геопросторової інформації дозволяє оцінити вплив локальних джерел забруднення та простежити зміну екологічної ситуації з плином часу, що є надзвичайно важливим для екологічного планування та міського управління.

Розроблена кіберфізична система є корисним інструментом для органів місцевої влади, екологів, урбаністів, а також дослідників у сфері змін клімату. Вона не лише дозволяє своєчасно виявляти перевищення нормативів CO<sub>2</sub>, але й підтримує ухвалення рішень щодо оптимізації транспортної інфраструктури та зниження викидів.

Система має потенціал до масштабування, що відкриває можливість використання її на національному та глобальному рівнях для формування баз знань про викиди парникових газів, формування трендів і реалізації ефективних заходів протидії зміні клімату. Також вона може інтегруватися з іншими екологічними платформами для комплексного аналізу якості повітря.

## ВИСНОВКИ

Викиди вуглецю є ключовим чинником глобального потепління та зміни клімату. Основним джерелом цих викидів є спалювання викопного палива для виробництва енергії, транспорту, промисловості та побутових потреб. Накопичення CO<sub>2</sub> в атмосфері порушує природний баланс парникових газів, спричиняючи підвищення середньої температури на планеті, танення льодовиків, підняття рівня світового океану та зростання частоти екстремальних погодних явищ. Відстеження, аналіз і прозоре управління викидами – необхідна умова для досягнення кліматичних цілей, визначених Паризькою угодою.

У першому розділі, у результаті проведеного дослідження встановлено, що транспортний сектор є одним з основних джерел викидів вуглецю (CO<sub>2</sub>) в атмосферу, особливо в умовах середніх урбанізованих міст, таких як Хмельницький. Аналіз впливу різних типів транспортних засобів, їх технічного стану та виду пального засвідчив, що великовагові та застарілі автомобілі генерують найбільшу кількість викидів. Розроблення кіберфізичної системи, яка забезпечує: автоматизоване відстеження викидів CO<sub>2</sub> у режимі реального часу, географічну локалізацію джерел забруднення, прогнозування динаміки викидів та інтерфейс візуалізації даних для прийняття управлінських рішень є актуальною задачею.

Реалізація такої системи дозволить не лише проводити ефективний моніторинг, а й створити підґрунтя для впровадження екологічних заходів, зокрема оптимізації транспортних потоків, розвитку електротранспорту та популяризації екологічної поведінки серед населення.

У другому розділі було проведено моделювання процесу моніторингу CO<sub>2</sub> є ключовим інструментом у формуванні екологічно орієнтованої транспортної політики. Застосування таких моделей дає змогу не лише зафіксувати поточні рівні викидів, а й сформулювати стратегії майбутнього розвитку міських систем з урахуванням кліматичних викликів. У дослідженні встановлено, що відстежування викидів може здійснюватися на різних масштабних рівнях — від

мікроскопічного до глобального. Мікросимуляції, агентно-орієнтовані моделі, а також системна динаміка дозволяють охопити як поведінкові аспекти пересування, так і структуру транспортної мережі та її взаємодію з іншими підсистемами міста. Особливу увагу було приділено порівнянню моделей та визначенню сфер їх доцільного застосування. Зокрема, емпіричні методи є ефективними для базового аналізу, тоді як моделі з використанням штучного інтелекту та супутникових даних забезпечують точний і масштабний моніторинг. Техніко-економічні моделі дозволяють проводити аналіз впливу транспорту на загальноекономічному рівні, що є особливо важливим для формування державної політики у сфері клімату. Процес аналізу викидів CO<sub>2</sub> в атмосферу структурується у вигляді послідовних етапів: від збору вхідних даних до візуалізації результатів. Особлива роль належить етапу обробки та валідації даних, оскільки якість інформації безпосередньо впливає на точність кінцевих висновків. Застосування моделей емісій, які враховують тип пального, масу транспортного засобу, маршрут, швидкість і стиль водіння, дає змогу отримати точну оцінку впливу кожного елемента транспортної системи.

Найбільш ефективною є комбінована модель, яка інтегрує кілька типів підходів: від мікросимуляцій до системної динаміки. Вона дозволяє формувати гнучкі рішення для адаптації міської інфраструктури до викликів зміни клімату, зменшення транспортного забруднення і підвищення стійкості міського середовища загалом.

У третьому розділі запропонований метод моніторингу викидів базується на комплексному підході, що передбачає поєднання сенсорних технологій, аналітичного програмного забезпечення, хмарної обробки даних та механізмів автоматизованого управління. Його головна перевага – можливість виявлення аномалій, прогнозування наслідків викидів і формування ефективних стратегій зниження вуглецевого сліду в реальному часі. Така система не лише забезпечує контроль за дотриманням екологічних норм, а й служить інструментом стратегічного планування у сфері сталого розвитку.

Також, система за результатами моніторингу здатна сформувати низку рекомендацій.

У четвертому розділі кваліфікаційної роботи вперше запропоновано архітектуру кіберфізичної системи моніторингу навколишнього середовища з акцентом на відстеження та аналіз викидів CO<sub>2</sub>, з використанням геолокаційних даних, багаторівневих сенсорних платформ та програмного забезпечення для обробки й візуалізації даних у режимі реального часу. На відміну від традиційних методів, розроблена система дозволяє безперервно фіксувати концентрацію CO<sub>2</sub> у різних міських зонах, зокрема в районах інтенсивного транспортного руху, житлових масивах і зелених зонах, що забезпечує високоточну локалізацію джерел надлишкових викидів.

Завдяки інтеграції даних з GPS, CAN-шини, а також додаткових сенсорів температури, тиску, та витрати пального, система створює детальну екологічну картину функціонування транспорту в реальному часі. Врахування геопросторової інформації дозволяє оцінити вплив локальних джерел забруднення та простежити зміну екологічної ситуації з плином часу, що є надзвичайно важливим для екологічного планування та міського управління.

Розроблена кіберфізична система є корисним інструментом для органів місцевої влади, екологів, урбаністів, а також дослідників у сфері змін клімату. Вона не лише дозволяє своєчасно виявляти перевищення нормативів CO<sub>2</sub>, але й підтримує ухвалення рішень щодо оптимізації транспортної інфраструктури та зниження викидів.

Система має потенціал до масштабування, що відкриває можливість використання її на національному та глобальному рівнях для формування баз знань про викиди парникових газів, формування трендів і реалізації ефективних заходів протидії зміні клімату. Також вона може інтегруватися з іншими екологічними платформами для комплексного аналізу якості повітря.

За темою кваліфікаційної роботи магістра опубліковані тези доповідей.

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Y. Wang, J. Li, D. Qu and X. Wang, Low-carbon economic operation strategy for a multi-microgrid system considering internal carbon pricing and emission monitorin, *J. Process Control*, vol. 143, p. 103313, November 2024.
2. L. F. Ilustre, Y. C. Mortos, J. Enriquez, J. Mindoro and M. A. Malbog, See Carbon: Real-time IoT Monitoring System for Motorcycle Vehicle Carbon Emissions, *E3S Web Conf.*, vol. 488, p. 03014, 2024.
3. W. Yan et al., Real-Time Carbon Emission Monitoring System for Coal-Fired Power Plants, in *Lecture Notes in Electrical Engineering*. Singapore: Springer Nature Singap., 2024, p. 456–462.
4. The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) is the United Nations body for assessing the science related to climate change. URL: <https://www.ipcc.ch/> (дата звернення: 15.11.2024).
5. Реалізації Порядку денного ООН у сфері сталого розвитку до 2030 року. URL: <https://www.undp.org/uk/ukraine/publications/peretvorennya-nashoho-svitu-poryadok-dennyu-u-sferi-staloho-rozvytku-do-2030-roku> (дата звернення: 15.11.2024).
6. Donald Huisingh, Zhihua Zhang, John C. Moore, Qi Qiao, Qi Li, Recent advances in carbon emissions reduction: policies, technologies, monitoring, assessment and modeling. *Journal of Cleaner Production*, Volume 103, 2015, Pages 1-12.
7. Beijing Air Pollution: Real-time Air Quality Index (AQI). URL: <https://aqicn.org/city/beijing/> (дата звернення: 20.11.2025).
8. Oliver Inderwildi, Chuan Zhang, Xiaonan Wang and Markus Kraft The impact of intelligent cyber-physical systems on the decarbonization of energy. *Energy & Environmental Science*, Issue 3, 2020, Pp. 28.
9. Sustainability - statistics & facts. URL: <https://www.statista.com/topics/7845/sustainability/#topicOverview> (дата звернення: 20.11.2025).

10. Статистика щодо викидів парникових газів у світі. URL: <https://ecopolitic.com.ua/ua/news/z-yavilasya-statistika-shhodo-vikidiv-parnikovih-gaziv-u-sviti-na-yakomu-misci-ukraina/> (дата звернення: 20.11.2025).

11. Медіаплатформа про екологічну політику України. Останні новини законодавства у сфері екології та охорони навколишнього середовища. URL: <https://ecopolitic.com.ua/ua/news/ukraina-zmenshila-vikidi-vuglecju-na-62-5-infografika/> (дата звернення: 22.11.2025).

12. Вплив російської війни в Україні на клімат 24 лютого 2022 – 1 вересня 2023. URL: <https://ecoaction.org.ua/wp-content/uploads/2024/01/Report-2023-December-UA-compressed.pdf> (дата звернення: 22.11.2025).

13. H. Zhou, Y. Shan, Z. Han, H. Meng, Y. He and J. Xu, "Design and Application of CEMS-Based Measurement Equipment for Carbon Dioxide Emissions from Stationary Sources," *2023 3rd International Signal Processing, Communications and Engineering Management Conference (ISPCEM)*, Montreal, QC, Canada, 2023, pp. 201-205.

14. HUANG Jian, ZHANG Zhen, FENG Lei, ZHENG Ming-Yue, LI Shen-Shen, LI Wen-Yi. Study on the industrial facilities carbon metering methodology based on the digital combination of Satellite-Radar-CEMS-Carbon Floating[J]. *Climate Change Research*, Vol. 21(2), 2025, Pp. 236-245.

15. Erfian, A., Syafei, A.D., Zuki, F.M. et al. Determining Carbon Dioxide Emission Factors of Indonesia Coal-Fired Power Plants with CEMS Measurement Data. *Aerosol Air Qual. Res.* 25, 3 (2025).

16. F. Qian, Y. Tang and X. Yu, The Future of Process Industry: A Cyber–Physical–Social System Perspective, in *IEEE Transactions on Cybernetics*, vol. 54, no. 7, pp. 3878-3889, July 2024.

17. Hongcheng Li, Jian Peng, Yachao Jia, Rong Luo, Huajun Cao, Yunpeng Cao, Yu Zhang, Haihong Shi, Dynamic carbon emissions accounting in the mixed production process of multi-pressure die-casting products based on cyber physical production system. *Journal of Manufacturing Systems*, Volume 78, 2025, Pp. 69-80.

18. Akkad M.Z., Haidar S., Bányai T. Design of Cyber-Physical Waste Management Systems Focusing on Energy Efficiency and Sustainability. *Designs*, Vol.6, 2022, Pp.39.
19. Rogall C., Mennenga M., Herrmann C., Thiede S. Systematic Development of Sustainability-Oriented Cyber-Physical Production Systems. *Sustainability*, 2022, Vol. 14(4), Pp. 2080 – 2095.
20. Сайт Хмельницької міської ради. URL: <https://www.khm.gov.ua/> (дата звернення: 26.12.2025).
21. Yingying Zhang, Jakob Beetz Building-CPS: Cyber-Physical System for Building Environment Monitoring. *Proc. of the Conference CIB W78*, 2021.
22. Zhou, C., Luo, H., Fang, W., Wei, R., & Ding, L. Cyber-physical-system-based safety monitoring for blind hoisting with the internet of things: A case study. *Automation in Construction*, 2019, Vol. 97, Pp.138-150.
23. Agostinelli S., Cumo F., Guidi G., Tomazzoli C. Cyber-Physical Systems Improving Building Energy Management: Digital Twin and Artificial Intelligence. *Energies*, 2021, Vol. 14, Pp.2338 - 2345.
24. Umabharati Rawat, Aalok Kumar, Chapter 12 - A cyber-physical system for improving the sustainability of freight logistics industry: A case of developing nation, *Evolution and Trends of Sustainable Approaches*, Elsevier, 2024, Pages 191-207.
25. M. Cortès Cornax, P. Lago, C. Roncancio, Cyber Physical Systems and Environmental Issues: a Smart Home Case Study, in: *CPSS4Sus*, 2022, Vol. 3144, CEUR, Pp. 1-11.
26. Y. Lu, S. Fang, G. Chen, T. Niu and R. Liao, Cyber-Physical Integration for Future Green Seaports: Challenges, State of the Art and Future Prospects, in *IEEE Transactions on Industrial Cyber-Physical Systems*, 2023, vol. 1, pp. 21-43.
27. Syed Saad, Wesam Salah Alaloul, Syed Ammad Role of Cyber-Physical Systems in Smart Cities. *Cyber-Physical Systems in the Construction Sector*, 1st Edition, 2022, P.19.

28. Around the world with RWE. URL: <https://www.rwe.com/en/> (дата звернення: 13.01.2025).
29. Paternina-Arboleda, C., Nestler, A., Kascak, N., Pour, M.S. Cybersecurity Considerations for the Design of an AI-Driven Distributed Optimization of Container Carbon Emissions Reduction for Freight Operations. *Computational Logistics*, 2023, Lecture Notes in Computer Science, vol 14239. Springer.
30. Chung-lam Ng, Ming Li, Ray Y. Zhong, Xinye Qu, George Q. Huang, Establishing carbon footprints for modular integrated construction logistics using cyber-physical internet routers. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2024, Volume 133, P.104259.
31. V. Kashansky, S. A. Hossein Kashani, J. Garcia-Blas, F. Marozzo, H. Zhuge and X. Sun, An Innovative Control Approach for Cyber-Physical Transportation Systems: The Case of Monte-Carlo Workflow Computations, 2024, *32nd Euromicro International Conference on Parallel, Distributed and Network-Based Processing (PDP)*, Dublin, Ireland, 2024, pp. 153-160.
32. Oyediran, A. O., Oke, A. E., Ikuabe, M. O., Aliu, J. O., Adeosun, F. E., & Aigbavboa, C. O. Exploring application areas of cyber-physical systems in the construction industry: a case of Nigeria. *International Journal of Construction Management*, 2025, Pp.1-13.
33. Що таке каліфорнійська програма обмеження та торгівлі? URL: <https://gram.kultura.cx.ua/maysternist/shho-take-kaliforniyska-programa-obmezhennya-ta-torgivli.html>. (дата звернення: 15.01.2025).
34. Rawat, U., Kumar, A. & Anbanandam, R. Evaluating the Preparedness of Freight Logistics Firms for Cyber-Physical Systems Integration: A SAP-LAP Methodology for Sustainable Development. *Glob J Flex Syst Management*, 2025, 26, Pp.1-23.
35. INDUSTRY LEADERS IN AIR EMISSIONS COMPLIANCE. URL: [escspectrum.com](https://escspectrum.com). (дата звернення: 25.01.2025).

36. M. U. Saleem, M. R. Usman, M. A. Yaqub, A. Liotta and A. Asim, Smarter Grid in the 5G Era: Integrating the Internet of Things With a Cyber-Physical System, in *IEEE Access*, 2024, vol. 12, pp. 34002-34018.
37. Sohail, A. M., Khattak, K. S., Khan, Z. H., Gulliver, T. A., & Altamimi, A. B. Exploring Vehicle Telematics in Intelligent Transportation Systems: Applications, Challenges, and Prospects. *Preprints*, 2025.
38. Hong-mei Zhao, Hong-di He, Dan-ni Lu, Dai Zhou, Chun-xia Lu, Xiao-ruì Fang, Zhong-ren Peng Evaluation of CO<sub>2</sub> and NO<sub>x</sub> emissions from container diesel trucks using a portable emissions measurement system. *Building and Environment*, 2024, Volume 252, P. 111266.
39. Mansourihanis, O., Maghsoodi Tilaki, M.J., Kookhaei, T., Zaroujtaghi, A., Sheikhsfarshi, S. and Abdoli, N. Integrating geospatial intelligence and spatio-temporal modeling for monitoring tourism-related carbon emissions in the United States, *Management of Environmental Quality*, 2025, Vol. 36 No. 1, pp. 107-129.
40. Tanmoy Palit, A.B.M. Mainul Bari, Chitra Lekha Karmaker, An integrated Principal Component Analysis and Interpretive Structural Modeling approach for electric vehicle adoption decisions in sustainable transportation systems. *Decision Analytics Journal*, 2022, Volume 4, P. 100119.
41. Cheng, Z., Hu, X. The effects of urbanization and urban sprawl on CO<sub>2</sub> emissions in China. *Environ Dev Sustain*, 2023, Vol. 25, Pp.1792–1808.
42. Chatti, Walid Moving towards environmental sustainability: information and communication technology (ICT), freight transport, and CO<sub>2</sub> emissions. *Heliyon*, 2022, Volume 7, Issue 10, e08190.
43. Sotiria Lagouvardou, Harilaos N. Psaraftis, Implications of the EU Emissions Trading System (ETS) on European container routes: A carbon leakage case study. *Maritime Transport Research*, 2022, Volume 3, P.100059.
44. Fangqing Wei, Xiaoqi Zhang, Junfei Chu, Feng Yang, Zhe Yuan, Energy and environmental efficiency of China's transportation sectors considering CO<sub>2</sub> emission uncertainty. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2021, Volume 97, P.102955.

45. B. S. Babu, J. Kamalakannan, N. Meenatchi, S. K. S. M, K. S and S. Boopathi, Economic impacts and reliability evaluation of battery by adopting Electric Vehicle, *2022 International Conference on Power, Energy, Control and Transmission Systems (ICPECTS)*, Chennai, India, 2022, pp. 1-6.
46. Mathe, S. E., Pamarthy, A. C., Kondaveeti, H. K., & Vappangi, S. (2022, February). A review on raspberry pi and its robotic applications. *In 2022 2nd International Conference on Artificial Intelligence and Signal Processing (AISP)*, pp. 1-6.
47. Pobitra Halder, Meisam Babaie, Farhad Salek, Nawshad Haque, Russell Savage, Svetlana Stevanovic, Timothy A. Bodisco, Ali Zare, Advancements in hydrogen production, storage, distribution and refuelling for a sustainable transport sector: Hydrogen fuel cell vehicles, *International Journal of Hydrogen Energy*, 2024, Volume 52, Part D, Pages 973-1004.
48. Naik, P., Kumbi, A., Telkar, N., Kotin, K., & Katti, K. C. (2017, December). An automotive diagnostics, fuel efficiency and emission monitoring system using CAN. *In 2017 International Conference on Big Data, IoT and Data Science (BIG DATA)* pp. 14-17.
49. Pramit Verma, Tanu Kumari, Akhilesh Singh Raghubanshi, Energy emissions, consumption and impact of urban households: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2021, Volume 147, P.111210.
50. Nastia Degiuli, Ivana Martić, Andrea Farkas, Ivan Gospić The impact of slow steaming on reducing CO2 emissions in the Mediterranean Sea. *Energy Reports*. 2021, Volume 7, Pages 8131-8141.
51. Yuanxing Yin, Huan Wang, Xiaojun Deng, Real-time logistics transport emission monitoring-Integrating artificial intelligence and internet of things. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2024, Volume 136, P. 104426.
52. Jia-Bao Liu, Bei-Ran Liu, Chien-Chiang Lee, Efficiency evaluation of China's transportation system considering carbon emissions: Evidence from big data analytics methods. *Science of The Total Environment*, 2024, Volume 922, P.171031.

53. Dalle, J., Hayat, A., Karim, A., Tirtayasa, S., Sulasmi, E., & Prasetya, I. The Influence of Accounting Information System and Energy Consumption on Carbon Emission in the Textile Industry of Indonesia: Mediating Role of the Supply Chain Process. *International Journal of Energy Economics and Policy*, 2020, 11(1), Pp.536-543.
54. Yi Shi, Jiuping Xu, BIM-based information system for econo-enviro-friendly end-of-life disposal of construction and demolition waste. *Automation in Construction*, 2021, Volume 125, P.103611.
55. Chunhong Zhang, Irfan Khan, Vishal Dagar, Asif Saeed, Muhammad Wasif Zafar, Environmental impact of information and communication technology: Unveiling the role of education in developing countries. *Technological Forecasting and Social Change*, 2022, Volume 178, P.121570.
56. Tingting XIE, Youyuan SUN, Zhen GUO, Mingguang SONG. Summary of Research and Application of Continuous Monitoring Technology for Carbon Emissions From Thermal Power Units[J]. *Power Generation Technology*, 2024, 45(5), Pp.919-928.
57. Zhu Liu, Taochun Sun, Ying Yu, Piyu Ke, Zhu Deng, Chenxi Lu, Da Huo, Xiang Ding, Near-Real-Time Carbon Emission Accounting Technology Toward Carbon Neutrality. *Engineering*, 2022, Volume 14, Pages 44-51.
58. Weifeng LYU, Yushu LI, Mingyuan WANG, Qianguo LIN, Ninghong JIA, Zemin JI, Chang HE, Application and prospects of spatial information technology in CO2 sequestration monitoring. *Petroleum Exploration and Development*, 2024, Volume 51, Issue 3, Pages 727-740.
59. Arash Heidari, Nima Jafari Navimipour, Mehmet Unal, Applications of ML/DL in the management of smart cities and societies based on new trends in information technologies: A systematic literature review. *Sustainable Cities and Society*, 2022, Volume 85, P.104089.
60. Ghazal, T.M., Hasan, M.K., Alzoubi, H.M., Alshurideh, M., Ahmad, M., Akbar, S.S. Internet of Things Connected Wireless Sensor Networks for Smart Cities. In: Alshurideh, M., Al Kurdi , B.H., Masa'deh, R., Alzoubi , H.M., Salloum, S. (eds)

*The Effect of Information Technology on Business and Marketing Intelligence Systems. Studies in Computational Intelligence*, 2023, vol 1056. Springer, Cham.

61. XIHUA, Zhang; GOYAL, S. Security and privacy challenges using IoT-blockchain technology in a smart city: critical analysis. *Int. J. Electr. Electron. Res*, 2022, 10.2: 190-195.
62. KHANG, Alex; RANI, Sita; SIVARAMAN, Arun Kumar (ed.). *AI-centric smart city ecosystems: technologies, design and implementation*. CRC Press, 2022.
63. GHAEMI, Ali Asghar. A cyber-physical system approach to smart city development. In: *2017 IEEE International Conference on Smart Grid and Smart Cities (ICSGSC)*. IEEE, 2017. p. 257-262.
64. Ezenkwu, C.P., Cannon, S. & Ibeke, E. Monitoring carbon emissions using deep learning and statistical process control: a strategy for impact assessment of governments' carbon reduction policies. *Environ Monit Assess*, 2024, 196, P.231.
65. Weilun Lao Carbon Emission Data Management System Fusion of Multi-Source Data. *Procedia Computer Science*, 2024, Volume 243, Pages 163-171.
66. Sepasgozar, S.M.E., Li, H., Shirowzhan, S. *et al.* Methods for monitoring construction off-road vehicle emissions: a critical review for identifying deficiencies and directions. *Environ Sci Pollut Res*, 2019, 26, Pp.15779–15794.
67. Xuan Zhang, Xueqing Zhang, An automated project carbon planning, monitoring and forecasting system integrating building information model and earned value method. *Journal of Cleaner Production*, 2023, Volume 397, P.136526.
68. N. U. Maulidevi, B. S. K. Aji, E. Hikmawati and K. Surendro, "Modeling Integrated Sustainability Monitoring System for Carbon Footprint in Higher Education Buildings," in *IEEE Access*, 2023, vol. 11, Pp. 135365-135376.
69. Daniel (Jian) Sun, Ying Zhang, Rui Xue, Yi Zhang, Modeling carbon emissions from urban traffic system using mobile monitoring. *Science of The Total Environment*, 2017, Volumes 599–600, Pages 944-951.
70. Zhou, C., Tang, Y., Zhu, D., Cui, Z. Tracking the Carbon Emissions Using Electricity Big Data: A Case Study of the Metal Smelting Industry. *Energies* 2024, 17, P.652.

71. Olatomiwa L., Ambafi J.G., Dauda U.S., Longe O.M., Jack K.E.; Ayoade I.A., Abubakar I.N.; Sanusi A.K. A Review of Internet of Things-Based Visualisation Platforms for Tracking Household Carbon Footprints. *Sustainability*, 2023, 15, P.15016.
72. Pengyan Ding, Construction of Carbon Emission Data Monitoring System Based on Multi-source Data Fusion. *Procedia Computer Science*, 2024, Volume 247, Pages 892-899.
73. Lasse F. Wolff Anthony, Benjamin Kanding, Raghavendra Selvan Carbontracker: Tracking and Predicting the Carbon Footprint of Training Deep Learning Models, *Computer Science*, 2020.
74. Liu, Z., Ciais, P., Deng, Z. *et al.* Carbon Monitor, a near-real-time daily dataset of global CO<sub>2</sub> emission from fossil fuel and cement production. *Sci Data*, 2020, Vol. 7, P. 392.
75. Guiwen Liu, Rundong Chen, Pengpeng Xu, Yan Fu, Chao Mao, Jingke Hong, Real-time carbon emission monitoring in prefabricated construction. *Automation in Construction*, 2020, Volume 110, P.102945.
76. Kaiguang Zhao, Juan C. Suarez, Mariano Garcia, Tongxi Hu, Cheng Wang, Alexis Londo, Utility of multitemporal lidar for forest and carbon monitoring: Tree growth, biomass dynamics, and carbon flux. *Remote Sensing of Environment*, 2018, Volume 204, Pages 883-897.
77. Ott W.R. Environmental Statistics and Data Analysis (1st ed.). New York: - Routledge, 2018. Pp.336/=.
78. Grasso, M., Laguzza, V., Semeraro, Q., and Colosimo, B. M. (November 10, 2016). In-Process Monitoring of Selective Laser Melting: Spatial Detection of Defects Via Image Data Analysis. ASME. *J. Manuf. Sci. Eng.* May 2017; 139(5): 051001
79. B. Tang *et al.*, Incorporating Intelligence in Fog Computing for Big Data Analysis in Smart Cities, in *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 13, no. 5, pp. 2140-2150, Oct. 2017.

80. A. Gharaibeh *et al.*, Smart Cities: A Survey on Data Management, Security, and Enabling Technologies, in *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2017, vol. 19, no. 4, pp. 2456-2501.

81. Lăzăroi, George, et al. Deep learning-assisted smart process planning, robotic wireless sensor networks, and geospatial big data management algorithms in the internet of manufacturing things. *ISPRS International Journal of Geo-Information* 11.5 (2022): 277.

82. Багрій К. Архітектура кіберфізичної системи відстежування і аналізу викидів вуглецю (CO<sub>2</sub>) у атмосферу. Збірник наукових праць за матеріалами Всеукраїнської науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «Інтелектуальні комп'ютерні системи та мережі» (Тернопіль – 2024. – С. 43-45).

## ДОДАТОК А

### НАУКОВА ПРАЦЯ ЗДОБУВАЧА

Багрій К. Архітектура кіберфізичної системи відстежування і аналізу викидів вуглецю (CO<sub>2</sub>) у атмосферу. Збірник наукових праць за матеріалами Всеукраїнської науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «Інтелектуальні комп'ютерні системи та мережі» (Тернопіль – 2024. – С. 43-45).

ЗАХІДНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ФАКУЛЬТЕТ КОМП'ЮТЕРНИХ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ  
КАФЕДРА КОМП'ЮТЕРНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ



**ВСЕУКРАЇНСЬКА НАУКОВО-ПРАКТИЧНА  
КОНФЕРЕНЦІЯ СТУДЕНТІВ, АСПІРАНТІВ ТА  
МОЛОДИХ ВЧЕНИХ  
«ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ КОМП'ЮТЕРНІ СИСТЕМИ ТА  
МЕРЕЖІ»**

**5 ЛИСТОПАДА 2024**



[KI.WUNU.EDU.UA/CONFERENCE/](http://KI.WUNU.EDU.UA/CONFERENCE/)

**ТЕРНОПІЛЬ  
2024**

Активі  
Перейди  
Wind

## ЗМІСТ

<i>Черкас Н.С., Батюк А.Є.</i> Survey of methods and approaches used in Maximal Extractable Value analysis.....	9
<i>Чорненький В.Я.</i> Дослідження впливу оптимізації та наборів даних на моделі машинного навчання при використанні на мобільних пристроях.....	13
<i>Чуприна А. А.</i> Інформаційна система контролю навчального процесу в школі .....	16
<i>Дудас В.С.</i> Кібербезпека для пристроїв розумного дому .....	19
<i>Глод С. І.</i> Методи та засоби розпізнавання військових об'єктів в режимі реального часу в умовах воєнного стану в Україні .....	22
<i>Кононович Ю.Ю., Цимбал Д.М.</i> Сучасні напрями дослідження стійкості криптосертифікатів.....	27
<i>Коваль А. В.</i> Побудва автоматизованих інфраструктур для запуску контейнерів у хмарі та на периферії .....	29
<i>Ляцинський П.Б.</i> Архітектура системи комп'ютерного діагностування .....	32
<i>Маркопольський С.В., Заболотна Д. В.</i> Штучний інтелект та академічна доброчесність: сучасні проблеми та майбутні перспективи .....	34
<i>Сидоренко О.В.</i> Проблематика побудови ієрархічної структури планування польотів повітряних суден .....	36
<i>Годя В. В., Ярмусь М. В.</i> Аналіз методів та алгоритмів реконструкції обличчя на основі стереозображень для біометричних систем .....	38
<i>Бадзь В.М.</i> Реалізація моделі визначення авторства англомовних текстів з використанням згорткових нейронних мереж.....	39
<i>Багрій К.О.</i> Архітектура кіберфізичної системи відстежування і аналізу викидів вуглецю (CO <sub>2</sub> ) у атмосферу.....	43
<i>Батько Ю.М.</i> Аналіз технологій автоматизованого тестування програмних, апаратних та програмно-апаратних систем.....	45
<i>Білас В.Є., Островський А.П.</i> Аналіз сучасних систем управління торговим підприємством.....	47
<i>Фурман Ю.О.</i> Міська система Інтернету речей для забезпечення підключення та збору даних з різних джерел .....	49
<i>Газда Н. Б.</i> Методи оптимізації продуктивності інтерфейсу кросплатформних симуляторів-тренажерів.....	51

Багрий К.О.  
 магістрант 2 курсу ФІТ ХНУ  
 Науковий керівник к.т.н., доцент Березька К.М., кафедра КПС ХНУ

## АРХІТЕКТУРА КІБЕРФІЗИЧНОЇ СИСТЕМИ ВІДСТЕЖУВАННЯ І АНАЛІЗУ ВИКИДІВ ВУГЛЕЦЮ (CO<sub>2</sub>) У АТМОСФЕРУ

**Вступ.** Актуальність відстежування і аналізу викидів вуглецю (CO<sub>2</sub>) у атмосферу стрімко зростає через глобальні екологічні, соціальні та економічні виклики, пов'язані з кліматичними змінами. Викиди вуглекислого газу є одним із головних чинників глобального потепління, яке викликає зміни клімату. Підвищення температури планети призводить до катастрофічних наслідків, таких як екстремальні погодні умови (повені, посухи, урагани), танення льодовиків і підвищення рівня моря. Відстежування та аналіз викидів CO<sub>2</sub> допомагають ідентифікувати джерела надмірних викидів та вжити заходів для їх скорочення. Відстежування викидів CO<sub>2</sub> дозволяє підприємствам краще управляти своїми витратами, впроваджувати "зелені" технології та уникати фінансових санкцій за надмірні викиди. Відстежування викидів вуглецю допомагає країнам і організаціям досягати цілей сталого розвитку (SDG), зокрема 13-ї цілі ООН щодо боротьби зі змінами клімату [1-3].

Отже, актуальність відстежування та аналізу викидів вуглецю (CO<sub>2</sub>) обумовлена необхідністю протидії глобальним змінам клімату, виконанням міжнародних кліматичних зобов'язань, забезпеченням сталого економічного розвитку та захистом здоров'я і добробуту людей. Ефективний моніторинг викидів CO<sub>2</sub> дає змогу вчасно впроваджувати необхідні заходи для зменшення впливу на довкілля та досягнення вуглецевої нейтральності. Тому задача розроблення кіберфізичної системи відстежування і аналізу викидів вуглецю (CO<sub>2</sub>) у атмосферу є актуальною та важливою.

**Постановка задачі.** Об'єкт дослідження – процес відстежування і аналізу викидів вуглецю (CO<sub>2</sub>) у атмосферу. Предмет дослідження – кіберфізична система відстежування і аналізу викидів вуглецю (CO<sub>2</sub>) у атмосферу. Головна мета даного дослідження полягає в автоматизації відстежування і аналізу викидів вуглецю (CO<sub>2</sub>) у атмосферу за допомогою кіберфізичної системи.

**Основний матеріал.** Впровадження систем відстежування CO<sub>2</sub> стимулює розвиток нових технологій, таких як відновлювана енергетика, системи зберігання енергії та технології уловлювання і зберігання вуглецю. Ці технології спрямовані на зменшення вуглецевого сліду та сприяють досягненню вуглецевої нейтральності.

Кіберфізична система (КФС) відстежування і аналізу викидів вуглецю (CO<sub>2</sub>) в атмосферу – це інтегрована система, яка поєднує фізичні компоненти (датчики, камери, пристрої збору даних) з цифровими технологіями (аналітичні алгоритми, штучний інтелект, хмарні обчислення). Вона призначена для точного моніторингу викидів парникових газів, аналізу даних в режимі реального часу та надання рекомендацій для скорочення викидів.

Архітектура кіберфізичної системи для моніторингу CO<sub>2</sub>:

1) фізичний рівень (збір даних) – на фізичному рівні відбувається збір даних про викиди CO<sub>2</sub> через різноманітні датчики та пристрої, встановлені на джерелах викидів або в навколишньому середовищі:

- сенсори CO<sub>2</sub>, призначені для безпосереднього вимірювання концентрації вуглецю у повітрі; встановлюються на заводах, транспортних системах та в будівлях;
- метеорологічні сенсори, призначені для вимірювання параметрів навколишнього середовища, такі як температура, тиск, вологість, які можуть впливати на поширення викидів;
- супутники та дрони використовуються для моніторингу великих територій та аналізу загальної концентрації CO<sub>2</sub> в атмосфері на регіональному або глобальному рівні;

2) локальна обробка даних:

- Інтернет речей (IoT) – мережа сенсорів і пристроїв, яка забезпечує передачу даних в режимі реального часу на локальні контролери або шлюзи для початкової обробки;

- локальні сервери та контролери – на цьому рівні дані від сенсорів зчитуються і фільтруються, щоб визначити ключові показники (наприклад, надмірні викиди CO<sub>2</sub> в певних зонах);

3) мережевий рівень (зв'язок і передача даних):

- бездротові мережі використовуються для передачі даних від сенсорів до центральної системи (Wi-Fi, 5G, LoRaWAN або інші технології);

- шлюзи та IoT-платформи забезпечують інтеграцію різних сенсорних систем і передачу даних на центральні або хмарні сервери для глибшого аналізу;

4) хмарний рівень (обчислювальна потужність і зберігання даних) – на хмарному рівні обробляються величезні масиви даних з різних джерел:

- великі дані та аналітичні платформи застосовуються для аналізу даних у великих масштабах, забезпечуючи прогнозування викидів, виявлення аномалій та розуміння довгострокових тенденцій;

- алгоритми машинного навчання та штучного інтелекту допомагають автоматизувати аналіз даних та надавати рекомендації щодо оптимізації роботи підприємств або транспортних систем для зниження викидів CO<sub>2</sub>;

- моделі прогнозування використовуються для оцінки можливого впливу певних політик або заходів зі зниження викидів, що допомагає в управлінні стратегіями декарбонізації;

5) інтерфейс користувача і прийняття рішень:

- панелі моніторингу та візуалізації – інтерактивні інтерфейси, через які оператори або менеджери отримують дані про викиди, порівняння з попередніми періодами та рекомендації щодо покращення ситуації;

- прийняття рішень у реальному часі – на основі аналізу система може автоматично пропонувати зміни для зменшення викидів, наприклад, змінювати роботу обладнання або перерозподіляти ресурси.

б) автоматизоване управління:

- контроль викидів – система автоматично регулює параметри виробничих процесів, транспортних засобів або енергетичних систем для зниження викидів CO<sub>2</sub> на основі даних, отриманих від сенсорів і аналітичних моделей;

- інтеграція з іншими системами – КФС може бути інтегрована з енергетичними мережами, системами відновлюваної енергії або інфраструктурою розумних міст для забезпечення максимальної ефективності в управлінні викидами.

Переваги кіберфізичної системи моніторингу CO<sub>2</sub>: точність і реальність, прогнозування і адаптація, глобальне охоплення, економічна вигода, екологічні переваги.

Виклики кіберфізичної системи: кібербезпека, інтеграція з існуючими інфраструктурами, вартість впровадження.

**Висновки.** Отже, було розроблено концепцію кіберфізичної системи моніторингу та аналізу викидів вуглецю CO<sub>2</sub>, яка є критично важливою для забезпечення сталого розвитку, боротьби зі змінами клімату та зменшення екологічних ризиків. Вона дозволяє автоматизувати контроль за викидами, підвищити ефективність промислових і транспортних процесів та досягти цілей з декарбонізації на глобальному рівні.

#### Список літератури

1. Y. Wang, J. Li, D. Qu and X. Wang, "Low-carbon economic operation strategy for a multi-microgrid system considering internal carbon pricing and emission monitoring", *J. Process Control*, vol. 143, p. 103313, November 2024.

2. L. F. Ilustre, Y. C. Mortos, J. Enriquez, J. Mindoro and M. A. Malbog, "See Carbon: Real-time IoT Monitoring System for Motorcycle Vehicle Carbon Emissions", *E3S Web Conf.*, vol. 488, p. 03014, 2024.

3. W. Yan et al., "Real-Time Carbon Emission Monitoring System for Coal-Fired Power Plants", in *Lecture Notes in Electrical Engineering*. Singapore: Springer Nature Singap., 2024, p. 456–462.

## ДОДАТОК Б

### ПРЕЗЕНТАЦІЯ РОБОТИ

# Метод та кіберфізична система відстежування та аналізу викидів вуглецю (CO<sub>2</sub>) в атмосферу

Виконав: магістр гр. КІ2М-23-1 Багрій К.О.  
Керівник: к.т.н., доцент Березька К.М.

Активация Wind

## Актуальність

- Актуальність відстежування і аналізу викидів вуглекислого газу (CO<sub>2</sub>) у атмосферу стрімко зростає через глобальні екологічні, соціальні та економічні виклики, пов'язані з кліматичними змінами. Викиди вуглекислого газу є одним із головних чинників глобального потепління, яке викликає зміни клімату. Підвищення температури планети призводить до катастрофічних наслідків, таких як екстремальні погодні умови (повені, посухи, урагани), танення льодовиків і підвищення рівня моря. Відстежування та аналіз викидів CO<sub>2</sub> допомагають ідентифікувати джерела надмірних викидів та вжити заходів для їх скорочення.

- Мета дослідження: забезпечення моніторингу в режимі реального часу викидів вуглецю (CO<sub>2</sub>) в атмосферу за рахунок методу та кіберфізичної системи відстежування і аналізу викидів вуглецю у атмосферу з фокусом на транспортний сектор у середніх містах України, що сприятиме зменшенню шкідливого впливу на навколишнє середовище.
- Об'єктом дослідження є процес відстежування і аналізу викидів вуглецю (CO<sub>2</sub>) у атмосферу.
- Предметом дослідження є кіберфізична система відстежування і аналізу викидів вуглецю (CO<sub>2</sub>) у атмосферу.

## Задачі дослідження

- 1) Провести аналіз відомих методів та рішень моніторингу викидів CO<sub>2</sub> та виявити їхні переваги і недоліки.
- 2) Змоделювати процес відстежування і аналізу викидів вуглецю CO<sub>2</sub> у атмосферу.
- 3) Сформуванати архітектуру кіберфізичної системи для відстеження викидів.
- 4) Розробити метод відстежування і аналізу викидів вуглецю CO<sub>2</sub> у атмосферу.
- 5) Розробити архітектуру кіберфізичної системи відстежування і аналізу викидів вуглецю CO<sub>2</sub> у атмосферу.
- 6) Оцінити ефективність розробленої системи та визначити напрями її подальшого удосконалення.

## Наукова новизна

- розроблено новий метод відстежування і аналізу викидів вуглецю CO<sub>2</sub> у атмосферу, який дозволяє відстежувати та опрацьовувати дані в режимі реального часу на різних локаціях;
- запропоновано архітектуру кіберфізичної системи відстежування і аналізу викидів вуглецю CO<sub>2</sub> у атмосферу зі стаціонарними сенсорами.

## Практична цінність отриманих результатів

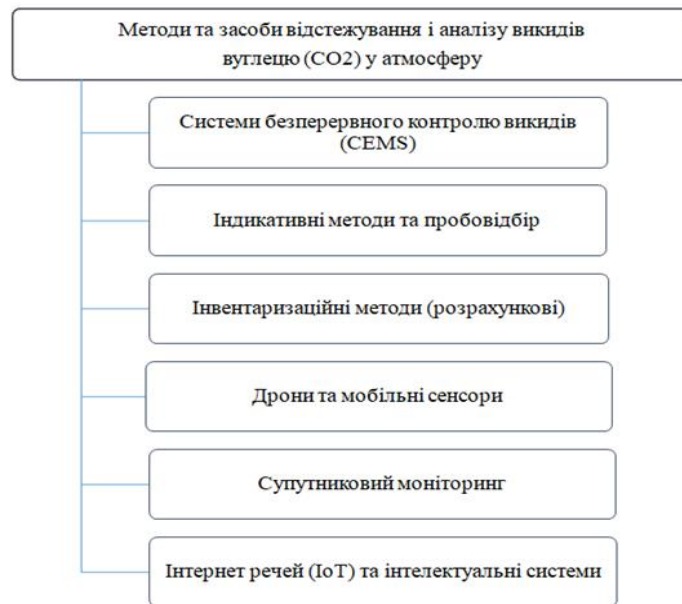
- Практична значимість отриманих результатів полягає у розробленому програмному забезпеченні відстежуванні та аналізу викидів вуглецю в режимі реального часу та видачі відповідних рекомендацій оператору.
- Розроблена кіберфізична система є корисним інструментом для органів місцевої влади, а також дослідників у сфері змін клімату. Вона не лише дозволяє своєчасно виявляти перевищення нормативів CO<sub>2</sub>, але й підтримує ухвалення рішень щодо оптимізації транспортної інфраструктури та зниження викидів.
- Система має потенціал до масштабування, що відкриває можливість використання її на національному та глобальному рівнях для формування баз знань про викиди парникових газів, формування трендів і реалізації ефективних заходів протидії зміні клімату. Також вона може інтегруватися з іншими екологічними платформами для комплексного аналізу якості повітря.

- Кліматичні зміни є однією з найгостріших загроз XXI століття, і ключовим чинником глобального потепління є надмірні викиди вуглецю CO<sub>2</sub> в атмосферу. За даними Міжурядової групи експертів зі змін клімату (IPCC), антропогенні викиди CO<sub>2</sub> становлять понад три чверті усіх парникових газів, що спричиняють парниковий ефект. Без системного підходу до моніторингу та аналізу цих викидів неможливо розробити ефективну кліматичну політику чи вжити заходів зі зменшення шкідливого впливу.
- Тому, на сьогоднішній день нагальною та актуальною є необхідність вирішення глобальної проблеми досягнення вуглецевої нейтральності. Ця нагальність підкреслюється тим фактом, що лише 12% з Цілей сталого розвитку, включно з найважливішими кліматичними цілями, були реалізовані на половині шляху до реалізації Порядку денного ООН у сфері сталого розвитку до 2030 року.

### Основні галузі моніторингу викидів CO<sub>2</sub>

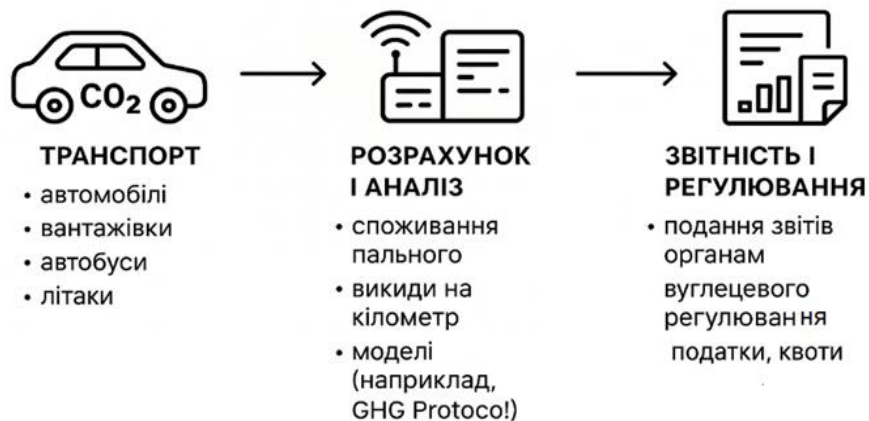
Галузь	Частка глобальних викидів CO <sub>2</sub> (%)	Основні джерела викидів	Методи моніторингу	Примітка
Енергетика	≈ 41%	ТЕС (вугілля, газ, нафта)	CEMS-системи, супутники GHGSat, Sentinel-5P	Найбільший сектор-викидач
Промисловість	≈ 24%	Цемент, сталь, хімія	Сенсори викидів, цифрові баланси маси	Викиди на одиницю продукту дуже високі
Транспорт	≈ 14%	Авто, авіація, морський транспорт	GPS, паливні звіти, сенсори, супутники	Динамічно зростає частка викидів
Сільське господарство	≈ 6–7% (CO <sub>2</sub> частково)	Вирубка лісів, зміна землекористування	Супутниковий аналіз LandSat, інвентаризація ґрунтів	CO <sub>2</sub> — лише частина загальних аграрних викидів
Будівництво	≈ 6%	Виробництво матеріалів, енерговитрати	BIM-моделі, LCA (аналіз життєвого циклу)	Потенціал до зниження за рахунок зелених технологій
Побутовий сектор	≈ 5–10%	Опалення, освітлення, споживання	Розумні лічильники, мобільні застосунки	Можна контролювати індивідуально через енергоефективність

## Методи та засоби відстежування і аналізу викидів вуглецю (CO<sub>2</sub>) у атмосферу



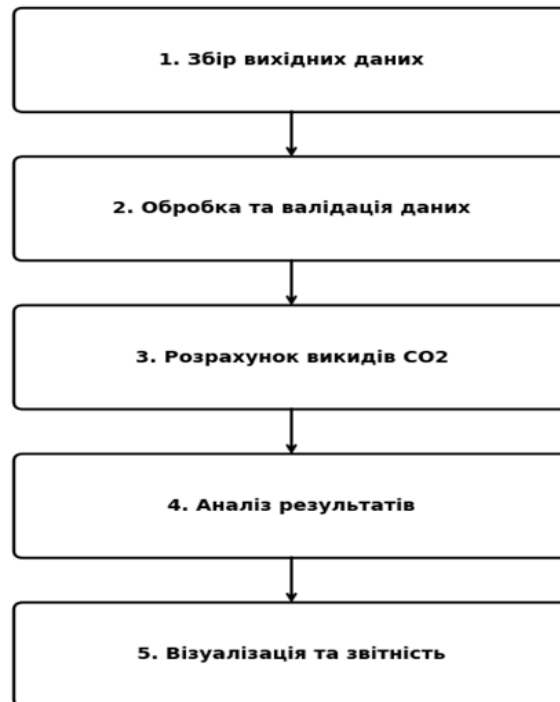
Активация Wind

## Структурна схема процесу відстежування викидів CO<sub>2</sub> у атмосферу від транспорту



Активация Wind

## Процес аналізу викидів вуглецю CO<sub>2</sub> у атмосферу



Активация Wind

## Відстежування та аналіз викидів вуглецю CO<sub>2</sub> від транспорту м.Хмельницький

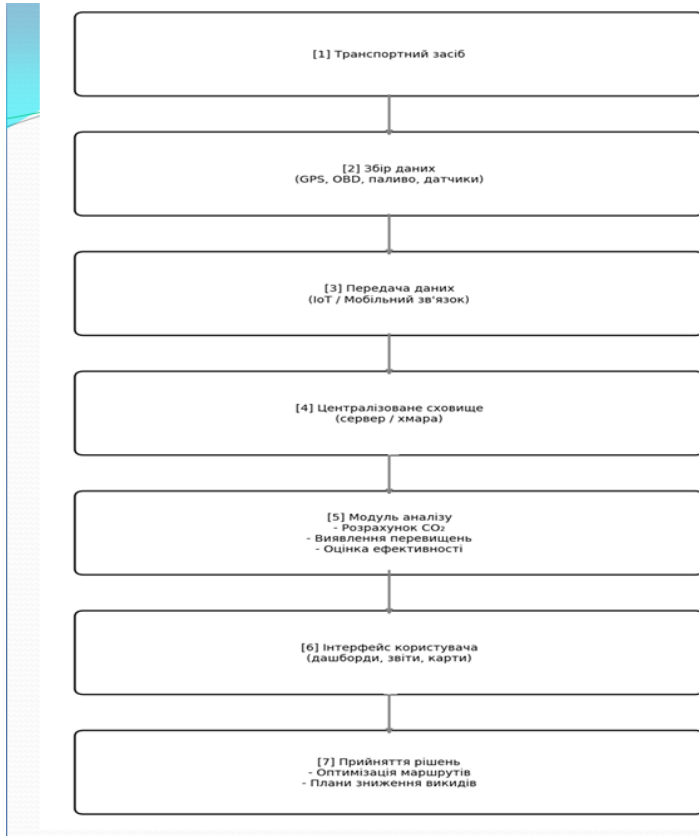
Наразі, згідно з даними, кількість зареєстрованих транспортних засобів у Хмельницькому за останні п'ять років зростає майже втричі, що призводить до збільшення викидів забруднюючих речовин в атмосферу.

Основними джерелами викидів є пересувні джерела, у першу чергу – автотранспорт. Згідно з даними Хмельницької міської ради, у 2020 році спостерігалось зменшення викидів оксиду вуглецю на 20,71% порівняно з 2019 роком, що було обумовлено докдауном та зменшенням транспортної активності.

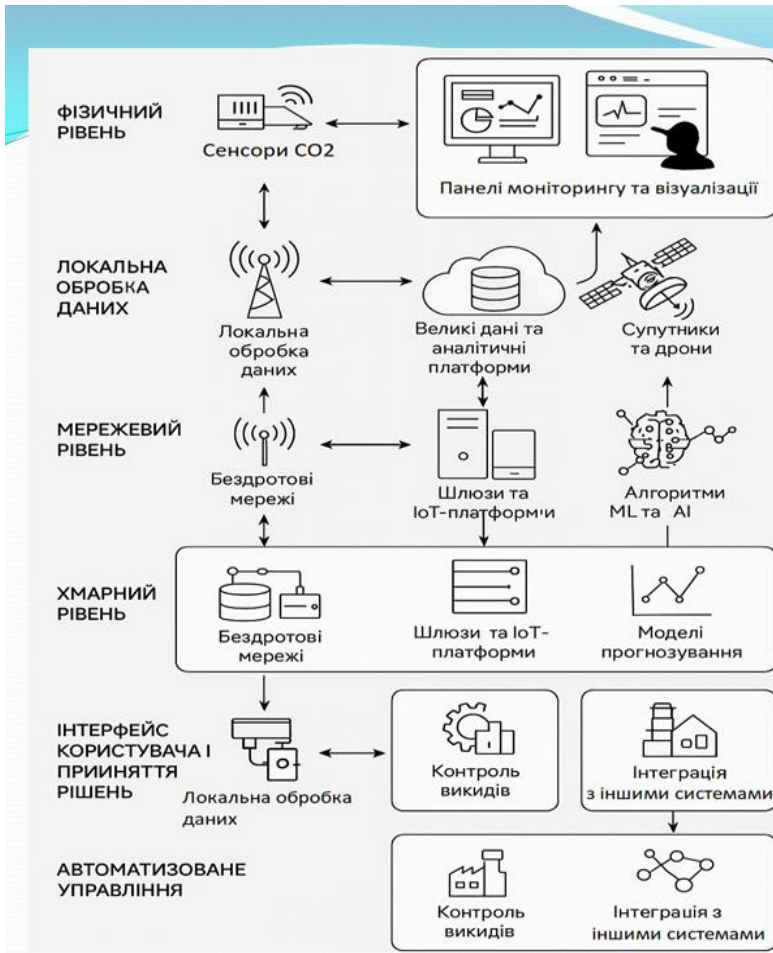
Що стосується методів моніторингу та аналізу, то у місті є стаціонарні пости спостереження. У Хмельницькому функціонують два стаціонарні пости моніторингу якості повітря, розташовані на вулиці Чорновола, 122 та на перетині вулиць Романа Шухевича і Олімпійської. Вони здійснюють спостереження за 19-ма інгредієнтами, включаючи оксид вуглецю та діоксид азоту.

Ще одним важливим моментом є те, що існує План дій «Зелене місто». У рамках цього плану передбачено заходи з покращення екологічної ситуації, зокрема зменшення викидів від транспорту шляхом розвитку громадського транспорту та впровадження екологічно чистих технологій

Активация Wind



## Кроки методу відстежування та аналізу викидів CO<sub>2</sub> від автотранспорту



## Структурна схема кіберфізичної системи відстежування та аналізу викидів CO<sub>2</sub> в атмосфері

## Візуалізація архітектурних шарів для кіберфізичної системи відстежування та аналізу викидів CO<sub>2</sub> у атмосферу



Активация Windows

## Сценарій моніторингу

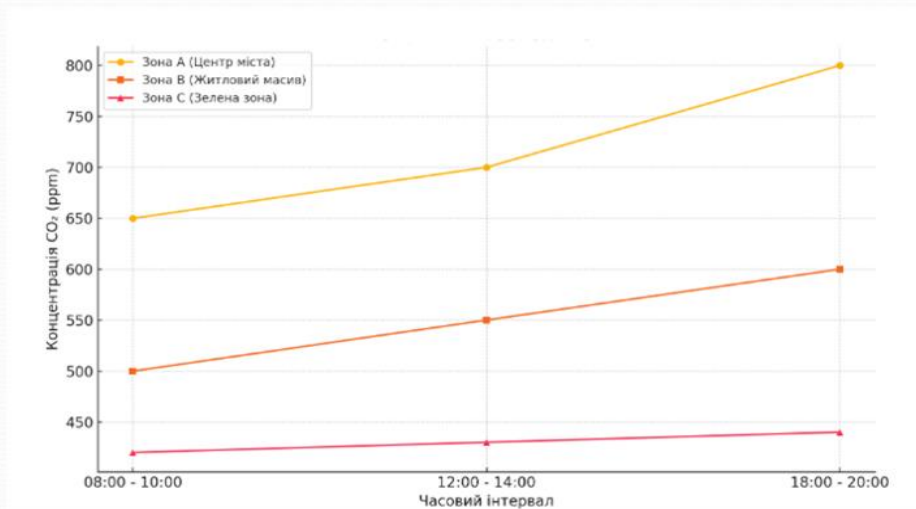
Зона	Тип зони	GPS-координати	Час моніторингу
Центральна площа	Інтенсивний рух	49.4225, 26.9861	08:00–20:00
Озерна	Житлова зона	49.4173, 27.0062	08:00–20:00
Парк ім.Чекмана	Зелена зона	49.4269, 26.9737	08:00–20:00

## Зібрані дані (CO<sub>2</sub>, ppm)

Час	Центральна площа	Озерна	Парк ім.Чекмана
08:00	560	510	430
10:00	610	520	440
12:00	680	540	450
14:00	720	560	470
16:00	750	580	480
18:00	700	550	470
20:00	640	520	460

Активация Windows

### Результати моніторингу викидів CO<sub>2</sub> в різних районах міста



Активация Wind

### Статистика даних моніторингу викидів CO<sub>2</sub>

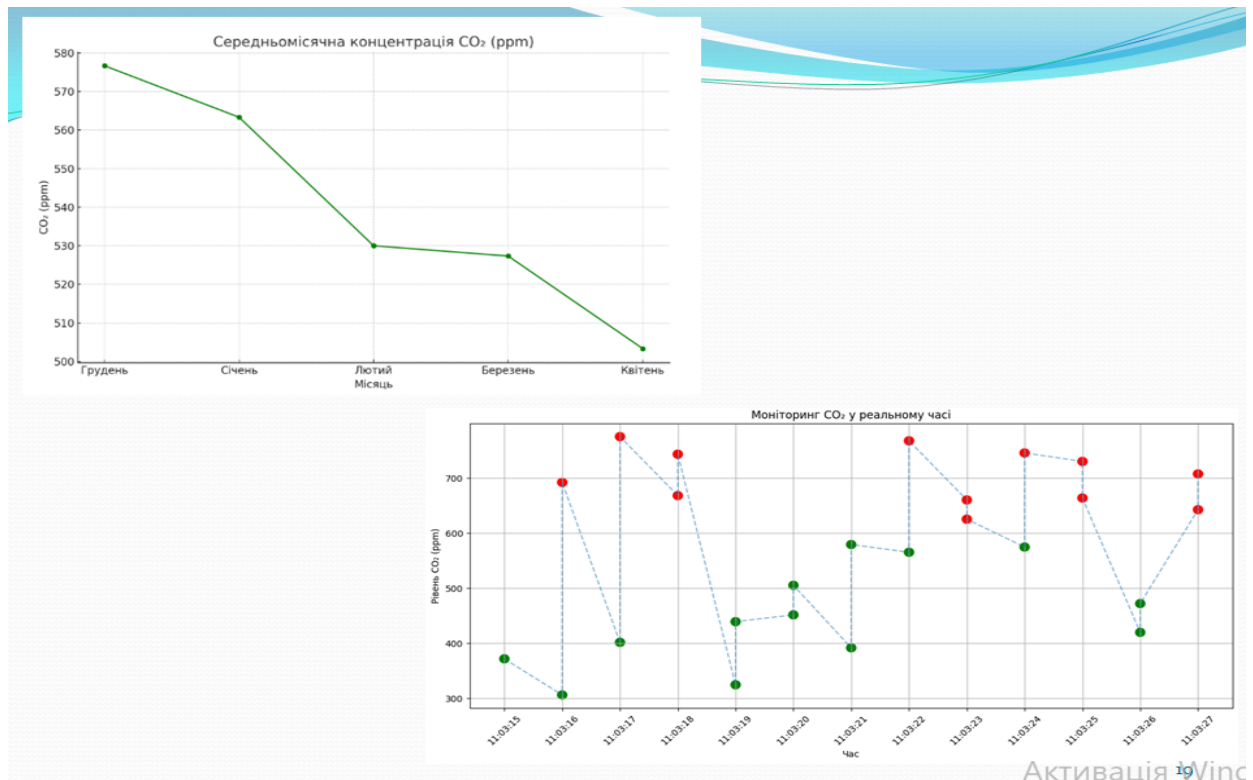
Дата	Район	Середнє CO <sub>2</sub> (ppm)
10.12	Центральна площа	700
	Озерна	560
	Парк ім.Чекмана	470
10.01	Центральна площа	680
	Озерна	550
	Парк ім.Чекмана	460
10.02	Центральна площа	640
	Озерна	520
	Парк ім.Чекмана	430
10.03	Центральна площа	642
	Озерна	520
	Парк ім.Чекмана	420
10.04	Центральна площа	600
	Озерна	510
	Парк ім.Чекмана	400

Помітне поступове зниження рівня викидів від грудня до квітня, що може свідчити про сезонні зміни або ефективність заходів із зниження викидів.

Озерна – стабільний рівень забруднення, з поступовим спадом. Парк Чекмана – найнижчі показники завдяки великій кількості зелених насаджень.

Центральна площа – найвищі показники через інтенсивний трафік і опалення взимку.

Активация Wind



## Висновки

- 1) У першому розділі проведено аналіз відомих рішень щодо методів та засобів відстежування і аналізу викидів вуглецю (CO<sub>2</sub>) у атмосферу та дослідження впливу автомобільного транспорту на зміну клімату та забруднення атмосфери.
- 2) У другому розділі розглянуто процеси відстежування та аналізу викидів вуглецю CO<sub>2</sub> у атмосферу та запропоновано модель процесу відстежування і аналізу викидів вуглецю CO<sub>2</sub> у атмосферу.
- 3) У третьому розділі здійснено проектування кіберфізичної системи відстежування та аналізу викидів вуглецю CO<sub>2</sub> в атмосферу від транспортної галузі м.Хмельницького та запропоновано метод відстежування та аналізу вуглецю CO<sub>2</sub>.
- 4) У четвертому розділі здійснено розроблення основних модулів кіберфізичної системи, а також проведено експеримент та узагальнено результати. На основі цих результатів показано рекомендації, які сформулировала система.



Дякую за увагу!

Завідувачці кафедри КПС  
доктору філософії, доценту  
Ользі ПАВЛОВІЙ

Багрія Костянтиновича Олександровича  
ІІБ здобувача вищої освіти

ФІТ, 2 курсу, групи КІ2м-23-1

### ЗАЯВА

З правилами чинного Положення «Про дотримання академічної доброчесності в Хмельницькому національному університеті» від 01.07.2022, 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 (StrikePlagiarism 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.

6.05.2025

дата

Нова

підпис

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

РЕЦЕНЗІЯ НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ

Дипломник: Багрій Костянтин Олександрович

Тема: Метод та кіберфізична система відстежування і аналізу викидів вуглецю (CO<sub>2</sub>) у атмосферу

Спеціальність: 123 «Комп'ютерна інженерія»

Обсяг дипломної роботи:

Кількість листів креслень —; кількість сторінок записки 95

1. Короткий зміст роботи та прийнятих рішень розроблено новий метод відстежування і аналізу викидів вуглецю CO<sub>2</sub> у атмосферу, який дозволяє відстежувати та опрацьовувати дані в режимі реального часу на різних локаціях; запропоновано архітектуру кіберфізичної системи відстежування і аналізу викидів вуглецю CO<sub>2</sub> у атмосферу, зі стаціонарними сенсорами, яка працює в реальному часі. На основі проведених досліджень розроблений метод та кіберфізична система і компоненти програмного забезпечення цієї системи. Практична значимість отриманих результатів полягає у розробленому програмному забезпеченні відстежуванні та аналізу викидів вуглецю в режимі реального часу та видачі відповідних рекомендацій оператору.

2. Висновок про відповідність роботи дипломному завданню Дипломна робота відповідає виданому завданню

3. Характеристика виконання кожного розділу, ступінь використання останніх досягнень науки і техніки і передових методів роботи: У вступі подано об'єкт та предмет дослідження, мету, наукову новизну та практичну цінність роботи, а також характеристику структури роботи.

У першому розділі проведено аналіз відомих рішень щодо методів та засобів відстежування і аналізу викидів вуглецю (CO<sub>2</sub>) у атмосферу та дослідження впливу автомобільного транспорту на зміну клімату та забруднення атмосфери.

У другому розділі розглянуто процеси відстежування та аналізу викидів вуглецю CO<sub>2</sub> у атмосферу та запропоновано модель процесу відстежування і аналізу викидів вуглецю CO<sub>2</sub> у атмосферу. У третьому розділі здійснено проектування кіберфізичної системи відстежування та аналізу викидів вуглецю CO<sub>2</sub> в атмосферу від транспортної галузі м.Хмельницького та запропоновано метод відстежування та аналізу вуглецю CO<sub>2</sub>.

У четвертому розділі здійснено розроблення основних модулів кіберфізичної системи, а також проведено експеримент та узагальнено результати. На основі цих результатів показано рекомендації, які сформувала система.

У висновках підведено підсумки досягнення результатів з розв'язання завдань дослідження.

4. Позитивні сторони роботи: Розроблена кіберфізична система є корисним інструментом для органів місцевої влади, екологів, урбаністів, а також дослідників у сфері змін клімату. Вона не лише дозволяє своєчасно виявляти перевищення нормативів CO<sub>2</sub>, але й підтримує ухвалення рішень щодо оптимізації транспортної інфраструктури та зниження викидів. Система має потенціал до масштабування

5. Негативні сторони роботи: В роботі не приділено достатньої уваги застосуванню методам опрацювання даних.

6. Оцінка графічного оформлення та пояснювальної записки роботи: —

7. Відгук про роботу в цілому: В загальному робота виконана на достатньому професійному рівні

8. Інші зауваження: —

9. Оцінка дипломної роботи:

Розглянувши позитивні та негативні сторони представленої дипломної роботи вважаю, що робота заслуговує оцінки «добре» 4,00 (С)

Рецензент (прізвище, ім'я, по батькові, посада, місце роботи)  
Мартишюк Валерій Володимирович, зав. каф.  
АІТІТ Р, ХІС

“7” 05 2025р.



19.05.25, 11:48

Багрий (3).html

Mon May 05 15:34:02 EEST 2025, Медзятий Дмитро Миколайович, Хмельницький національний університет, ХНУ

## Anti-Plagiarism v-15.274 Educational

**The maximum coincidence with one document 0.0%**

Dictionary check: en\_US, ru\_RU, ua\_UA. **Errors in the documents: 9%**

ID: 240837 Title: МКР Метод та кіберфізична система відстежування і аналізу викидів вуглецю (CO2) у атмосферу Added in a DB: 2025-05-05 Authors: Костянтин БАГРІЙ Heads: Катерина БЕРЕЗЬКА Consultants: Opponents:	Document		Sum coincidence on the DB	
	Symbols	Lexemes	Symbols	Lexemes
	145358	1124	1177 (1%)	18 (2%)

### Plagiarism sources

ID	Description	Plagiarism presence in the document	
		Symbols	Lexemes

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

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

Назва: Метод та кіберфізична система відстежування і аналізу викидів вуглецю (CO<sub>2</sub>) у атмосферу

Автор: Багрий Костянтин Олександрович

Спеціальність: 123 – Комп'ютерна інженерія

Освітня програма: освітньо-наукова

Науковий керівник: Березька К.М., 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, виправданій 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, виправданій 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 допрацьована і успішно пройде повторну перевірку на академічний плагіат.	
4	Робота містить найменші ознаки спотворення, передбачувани спроби укривтя 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:

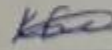
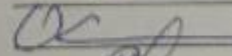

- 1) усі запозичення фрагментарні, або мають належним чином оформлені посилання;
- 2) окремі виявлені збіги є загальноживаними фразами або виразами, про що свідчить посилання системи на збіг з джерелами на один фрагмент речення;
- 3) всі зафіксовані системою ознаки модифікації тексту відносяться до комбінування латинських символів із латинськомовними позначеннями в математичних формулах, що не є модифікацією тексту.

Сумарний обсяг всіх запозичень, визначений системою виявлення збігів/ідентичності/схожості StrikePlagiarism, складає 4,54% і адресується до 90 періоджерела; та системою Anti-Plagiarism складає 0%.

Керівник роботи

Гаршт ОП

Завідувач кафедри КІС

Катерина БЕРЕЗЬКА

Олег САВЕНКО

Ольга ПАВЛОВА

### Протокол аналізу звіту подібності експертом

Заявляю, що я ознайомився (-лась) з Повним звітом подібності, який був згенерований Системою виявлення і запобігання плагіату щодо роботи:

**Автор:** Костянтин БАГРІЙ

**Співавтор:**

**Назва:** Багрій\_Метод та кіберфізична система відстежування і аналізу викидів вуглецю (CO2) у атмосферу

**Експерт:**

**Підрозділ:** Кафедра комп'ютерної інженерії та інформаційних систем

**Коефіцієнт подібності 1:**4.5%

**Коефіцієнт подібності 2:**2.5%

**Мікропробіли:** 86

**Заміна букв:** 4

**Інтервали:** 0

**Білі знаки:** 1

**Дата створення звіту:** 2025-05-05 17:19:01.0

Після аналізу Звіту подібності констатую наступне:

Запозичення, виявлені в роботі є законними і не є плагіатом. Рівень подібності не перевищує допустимої межі. Таким чином робота незалежна і приймається.

Запозичення не є плагіатом, але перевищено граничне значення рівня подібностей. Таким чином робота повертається на доопрацювання.

Виявлено запозичення і плагіат або навмисні текстові спотворення (маніпуляції), як передбачувані спроби укриття плагіату, які роблять роботу невідповідною вимогам законодавства (Ст. 32. ЗУ Про вищу освіту, пункт 3.1, Ст. 42. ЗУ Про освіту) та вимог НАЗЯВО (Критерій 5), а також кодексу етики і процедурам. Таким чином робота не приймається.

Обґрунтування:

2025-05-06

Дата



Доцент Андрій Нічепорук

експерт