

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

**Факультет робототехніки та приладобудування
Кафедра автоматизації та систем неруйнівного контролю**

До захисту допущено:

Завідувач кафедри

_____ Юрій КИРИЧУК

«__» _____ 20__ р.

Дипломний проєкт

на здобуття ступеня бакалавра

**за освітньо-професійною програмою «Комп'ютерно-інтегровані системи
та технології в приладобудуванні»**

**спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані
технології»**

**на тему: «Система автоматичного моніторингу стану довкілля об'єктів
енергетики»**

Виконав (-ла):

студент (-ка) IV курсу, групи ПК-21

Мусік Ярослав Андрійович _____

Керівник:

д.т.н., професор

Куц Юрій Васильович _____

Рецензент:

доцент, доктор філософії кафедри ІВТ

Дорожинська Ганна Василівна _____

Засвідчую, що у цьому дипломному
проєкті немає запозичень з праць інших
авторів без відповідних посилань.

Студент (-ка) _____

Київ – 2026 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Факультет робототехніки та приладобудування
Кафедра автоматизації та систем неруйнівного контролю

Рівень вищої освіти — перший (бакалаврський)

Спеціальність — 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

Освітньо-професійна програма «Комп'ютерно-інтегровані системи та технології в приладобудуванні»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Юрій КИРИЧУК

«__» _____ 2026 р.

ЗАВДАННЯ
на дипломний проєкт студенту
Мусіку Ярославу Андрійовичу

1. Тема проєкту «Система автоматичного моніторингу стану довкілля об'єктів енергетики», керівник проєкту Куц Юрій Васильович, д.т.н., проф., затверджені наказом по університету від «26» травня 2026 р. №1905.
2. Термін подання студентом проєкту: 8 червня 2026 р.
3. Вихідні дані до проєкту: технічні характеристики газових датчиків MQ-7, MQ-131 та MQ-136, параметри мікроконтролера ESP32, вимоги до системи автоматичного моніторингу якості атмосферного повітря, вимоги до збору, передачі та обробки даних, нормативні документи щодо контролю стану навколишнього середовища.
4. Зміст пояснювальної записки:
 - аналіз сучасних систем моніторингу якості повітря,
 - розроблення структури автоматичної системи моніторингу стану довкілля об'єктів енергетики,
 - обґрунтування вибору апаратних засобів системи,
 - порівняльний аналіз газових датчиків серії MQ,
 - опис принципу роботи системи,
 - розроблення даних із використанням ESP32 та MATLAB.

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо): структурна схема автоматизованої системи моніторингу якості повітря, функціональна схема системи, схема підключення датчиків MQ до мікроконтролера ESP32, схема передачі та обробки даних, презентація дипломного проєкту.

6. Дата видачі завдання: 20 квітня 2026 р.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проєкту	Термін виконання етапів проєкту	Примітка
1.	Аналіз предметної області та постановка задачі	20.04.2026 - 24.04.2026	Виконано
2.	Дослідження сучасних систем моніторингу якості повітря	25.04.2026 - 29.04.2026	
3.	Порівняльний аналіз газових датчиків серії MQ	30.04.2026 - 04.05.2026	
4.	Вибір апаратної платформи та компонентів системи	05.05.2026 - 09.05.2026	
5.	Розробка структурної схеми системи моніторингу	10.05.2026 - 15.05.2026	
6.	Розробка функціональної схеми та алгоритму роботи системи	16.05.2026 - 21.05.2026	
7.	Розробка системи збору, передачі та обробки даних	22.05.2026 - 28.05.2026	
8.	Аналіз результатів та підготовка графічних матеріалів	29.05.2026 - 03.06.2026	
9.	Оформлення пояснювальної записки та підготовка до захисту	04.06.2026 - 06.06.2026	

Студент(-ка)

Ярослав МУСІК

Керівник

Юрій КУЦ

ВІДОМІСТЬ ДИПЛОМНОГО ПРОЄКТУ

№ з/п	Формат	Позначення	Найменування	Кількість листів	Примітка
1	A4		Завдання на дипломний проєкт	2	
2	A4	ДП ПК-21.11.1760.00.00 ПЗ	Пояснювальна записка	58	
3	A1	ДП ПК-21.11.1760.01.000 Сх	Структурна схема автоматизованої системи моніторингу якості повітря	1	
4	A1	ДП ПК-21.11.1760.02.000 СхЕ	Електрична схема системи моніторингу	1	
5	A1	ДП ПК-21.11.1760.03.000 СА	Алгоритм роботи системи	1	
6	A1	ДП ПК-21.11.1760.04.000 Сх	Схема підключення газових датчиків MQ до ESP32	1	
7	A1	ДП ПК-21.11.1760.05.000 Сх	Структурна схема контролера збору та обробки даних	1	
8	A1	ДП ПК-21.11.1760.06.000 Сх	Схема передачі та відображення даних моніторингу	1	
9	A1	ДП ПК-21.11.1760.07.000 ТК	Технічне креслення або таблиця технічних характеристик системи	1	

				ДП ПК-21.11.1760.00.00		
	ПБ	Підп.	Дата	Відомість дипломного проєкту		
Розробн.	Мусік Я.А.					
Керівн.	Куц Ю.В.					
Консульт.						
Н/контр.						
Зав.каф.	Киричук Ю.В.			Лист 1 Листів 1		
				КПІ ім. Ігоря Сікорського Каф. АСНК Гр. ПК-21		

**Пояснювальна записка
до дипломного проєкту
на тему: «Система автоматичного моніторингу стану
довкілля об'єктів енергетики»**

Київ – 2026 року

АНОТАЦІЯ

Об'єктом розроблення є система автоматизованого моніторингу стану атмосферного повітря в зоні розташування об'єктів енергетики.

Метою роботи є підвищення ефективності екологічного контролю шляхом створення автоматизованої системи збору, передачі та обробки даних про концентрацію забруднюючих речовин у повітрі.

У дипломному проєкті розглянуто сучасні підходи до моніторингу якості атмосферного повітря, виконано аналіз існуючих систем контролю та проведено порівняльний аналіз газових датчиків серії MQ. Для реалізації системи обрано мікроконтролерну платформу ESP32, яка забезпечує збір даних від сенсорів, їх первинну обробку та передачу до програмного середовища для подальшого аналізу.

Розроблено структуру автоматизованої системи моніторингу, функціональну схему взаємодії її компонентів та алгоритм роботи системи. Для контролю концентрації шкідливих речовин запропоновано використання датчиків MQ-7, MQ-131 та MQ-136, що дозволяють здійснювати вимірювання вмісту чадного газу, оксидів азоту та діоксиду сірки. Для аналізу та обробки отриманих даних передбачено використання середовища MATLAB.

Отримані результати можуть бути використані під час створення систем екологічного моніторингу на об'єктах енергетики та інших промислових підприємствах з метою своєчасного виявлення перевищення допустимих концентрацій шкідливих речовин і підвищення рівня екологічної безпеки.

SUMMARY

The object of development is an automated environmental monitoring system for energy facilities.

The purpose of the work is to improve the efficiency of environmental monitoring by developing an automated system for collecting, transmitting, and processing data on atmospheric air quality.

The diploma project examines modern approaches to environmental and air quality monitoring, analyzes existing monitoring systems, and presents a comparative analysis of MQ-series gas sensors. For the implementation of the system, the ESP32 microcontroller platform was selected due to its capabilities for data acquisition, processing, and wireless transmission.

The structure of the automated monitoring system, its functional scheme, and the operating algorithm were developed. The system utilizes MQ-7, MQ-131, and MQ-136 gas sensors for monitoring carbon monoxide, nitrogen oxides, and sulfur dioxide concentrations in the atmosphere. Data transmission, processing, and analysis are performed using modern software tools, including MATLAB, which provides visualization and analytical capabilities for environmental assessment.

The developed system enables continuous monitoring of environmental conditions, timely detection of hazardous pollutant concentrations, and efficient processing of measurement results. The proposed solution can be applied at energy facilities and other industrial enterprises to improve environmental safety and support decision-making based on real-time monitoring data.

The obtained results may be used in the development and implementation of environmental monitoring systems for energy facilities and other industrial objects requiring continuous control of atmospheric air quality.

ЗМІСТ

Вступ.....	10
1 Огляд сучасних систем моніторингу якості повітря та обґрунтування вимог до системи контролю.....	12
1.1 Розподілені системи моніторингу якості повітря	12
1.2 Гібридні системи моніторингу якості повітря	14
1.3 Порівняльний аналіз систем моніторингу.....	15
1.4 Обґрунтування вимог до системи контролю якості повітря.....	16
Висновки до розділу 1	17
2 Обґрунтування математичної моделі розповсюдження забруднюючих речовин	19
2.1 Фізичні основи процесу розповсюдження домішок.....	19
2.2 Вибір математичної моделі (гаусівська модель)	21
2.3 Основні параметри моделі та припущення	22
2.4 Придатність моделі для задач моніторингу якості повітря	23
Висновки до розділу 2	25
3 Розроблення автоматизованої системи моніторингу якості повітря	26
3.1 Загальна структура системи моніторингу	26
3.2 Датчики контролю якості повітря та їх технічні характеристики.....	28
3.3 Організація збору, передачі та обробки даних	29
3.4 Використання GPS-трекерів у системі моніторингу (рухомі платформи).....	32
Висновки до розділу 3	34
4 Методи моделювання процесу розповсюдження забруднюючих речовин.....	35
4.1 Загальні вимоги до моделювання.....	35
4.2 Моделювання розповсюдження у просторі	36
4.3 Моделювання зміни концентрації у часі	39
4.4 Визначення моментів перевищення гранично допустимих концентрацій	42
Висновки до розділу 4	44
5 Реалізація системи аналізу та візуалізації результатів у середовищі matlab.....	46

5.1 Аналіз концентрацій забруднюючих речовин CO, NO ₂ та SO ₂	46
5.2 Алгоритм визначення перевищення ГДК	49
5.3 Візуалізація результатів моделювання	51
5.4 Аналіз зон екологічного ризику	52
Висновки до розділу 5	54
Висновки	56
Список використаних джерел	58

ВСТУП

Якість повітря сильно впливає на повсякденне життя і самопочуття людей. Це особливо помітно в місцях, де працюють енергетичні об'єкти, зокрема теплоелектростанції. Під час їх роботи в повітря потрапляють шкідливі речовини, такі як оксид вуглецю, діоксид азоту і діоксид сірки. Коли їх стає забагато, це вже починає становити небезпеку і для людей, і для довкілля.

Складність у тому, що рівень забруднення постійно змінюється. На нього впливає багато факторів: як працює обладнання, яка погода, чи є вітер і яка його швидкість. Якщо робити вимірювання лише час від часу, то вони показують ситуацію тільки в один конкретний момент. Повної картини це не дає, тому потрібні системи, які можуть працювати безперервно і відстежувати зміни в реальному часі.

Є ще одна проблема. Забруднення розповсюджується нерівномірно. Біля джерела концентрація може бути високою, а вже через кількасот метрів значно меншою або навпаки змінюватися через умови середовища. Через це одного датчика недостатньо. Важливо розуміти, як змінюється концентрація в різних точках і як вона поводить себе з часом.

Щоб розібратися з такими процесами, використовують математичне моделювання. Воно допомагає не тільки аналізувати вже отримані дані, а й оцінювати ситуацію там, де вимірювань немає. За рахунок цього можна побачити більш повну картину і зрозуміти, де можуть виникати небезпечні зони.

У цій роботі зроблено акцент на поєднанні вимірювань і моделювання. З одного боку, є датчики, які дають реальні значення, з іншого є модель, яка дозволяє оцінити, як ці значення розподіляються в просторі і змінюються з часом. Такий підхід виглядає більш адекватним, ніж використання лише одного з цих варіантів.

Основна мета полягає в тому, щоб створити математичну модель і реалізувати систему моніторингу якості повітря в MATLAB. Ідея не обмежується простим

розрахунком концентрацій. Потрібно зробити систему, яка сама аналізує дані і може показати момент, коли рівень забруднення перевищує допустимі значення.

Робота побудована послідовно. Спочатку розглядаються існуючі підходи до контролю якості повітря і формуються вимоги до системи. Потім обирається математична модель і пояснюється, чому саме вона підходить. Далі описується структура системи, включаючи датчики, передачу інформації та її обробку. Окремо розглядається процес розповсюдження забруднень і аналіз результатів моделювання. На завершення реалізується алгоритм, який визначає перевищення допустимих концентрацій, і показуються результати у зручному вигляді.

Об'єктом дослідження виступає процес поширення забруднюючих речовин у повітрі, а предметом є методи і засоби, які дозволяють цей процес описати, змодельовати і застосувати в системі моніторингу.

Отримані результати можна використати як основу для створення реальної системи контролю якості повітря. Така система допоможе швидше реагувати на небезпечні ситуації і краще розуміти, що відбувається в зоні впливу енергетичних об'єктів.

1 ОГЛЯД СУЧАСНИХ СИСТЕМ МОНІТОРИНГУ ЯКОСТІ ПОВІТРЯ ТА ОБҐРУНТУВАННЯ ВИМОГ ДО СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ

У цьому розділі розглянуто, як зараз підходять до контролю якості повітря, зокрема мова йде про розподілені та гібридні системи. Основний акцент зроблено на тому, як вони працюють у реальних умовах, а не лише в теорії. Після аналізу таких рішень виділяються їх характерні риси і на цій основі формуються вимоги до автоматизованої системи моніторингу, яка розробляється в роботі.

1.1 Розподілені системи моніторингу якості повітря

Розподілені системи моніторингу якості повітря базуються на використанні мережі сенсорів, які розміщуються на різних ділянках контрольованої території. Вони дозволяють безперервно вимірювати концентрації забруднюючих речовин і отримувати дані в різних точках, щоб сформувати більш повну картину розподілу забруднення [7] (рис. 1.1).

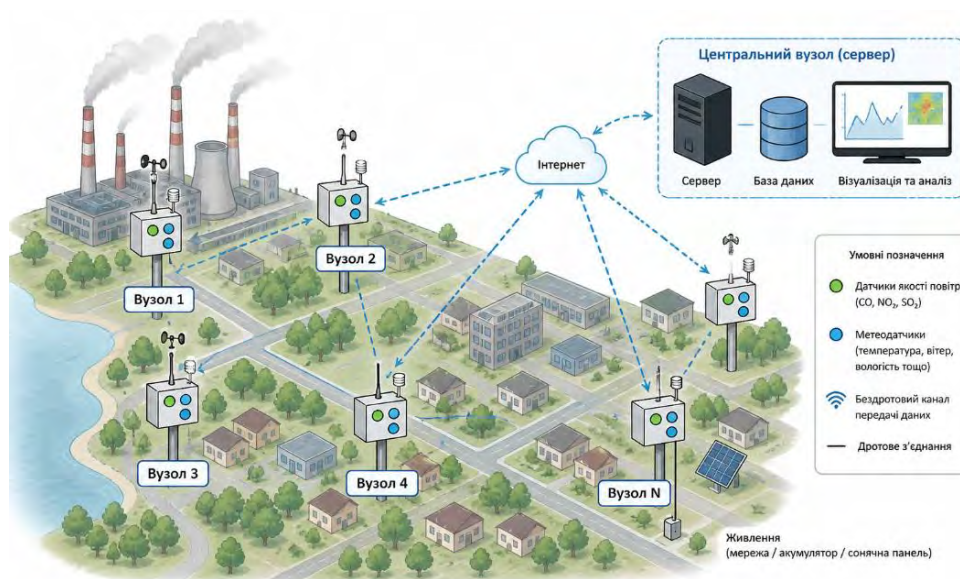


Рис. 1.1. Приклад розподіленої системи моніторингу якості повітря

Типова система зазвичай складається з газових датчиків, які вимірюють CO, NO₂, SO₂, а також сенсорів, що фіксують метеорологічні параметри. Кожен окремий вузол збирає інформацію і передає її на центральний пристрій або сервер, де вже виконується обробка і подальший аналіз. Передача даних може бути організована по-різному, інколи через кабель, інколи бездротово, все залежить від умов, у яких працює система.

Головний плюс таких рішень у тому, що вони дають дані не з однієї точки, а одразу з кількох. Це дозволяє помітити локальні ділянки з підвищеним рівнем забруднення, оцінити, як саме впливають джерела викидів, і простежити, як змінюється концентрація в різних місцях. Для контролю повітря це має значення, бо навіть на невеликій відстані показники можуть суттєво відрізнитися [7].

Такі системи добре підходять, коли потрібно контролювати великі території, наприклад промислові зони або міські райони. Вони дають достатньо багато реальних даних, які можна використати для подальшого аналізу, перевірки моделей і відслідковування змін з часом.

Але є і свої мінуси. Щоб отримати точні результати, потрібно встановлювати багато датчиків, а це одразу збільшує витрати. До того ж дані залишаються прив'язаними до конкретних точок, між якими інформації фактично немає. Не варто забувати і про обслуговування, датчики потрібно регулярно перевіряти і калібрувати.

Якщо говорити про моніторинг біля енергетичних об'єктів, такі системи дозволяють контролювати реальні значення концентрацій у важливих місцях, особливо там, куди розповсюджуються викиди. Це дає можливість вчасно фіксувати перевищення допустимих рівнів і оцінювати вплив об'єкта.

З урахуванням цього розподілені системи краще розглядати як джерело фактичних даних. Але щоб отримати більш повну картину, їх доцільно поєднувати з математичним моделюванням, яке допомагає заповнити прогалини між точками вимірювання і зробити моніторинг більш ефективним [1].

1.2 Гібридні системи моніторингу якості повітря

Гібридні системи моніторингу якості повітря поєднують у собі вимірювання за допомогою датчиків і математичне моделювання процесу розповсюдження забруднюючих речовин. Такий підхід дозволяє отримати більш повну картину стану повітря, ніж при використанні лише сенсорів [7] (рис. 1.2).

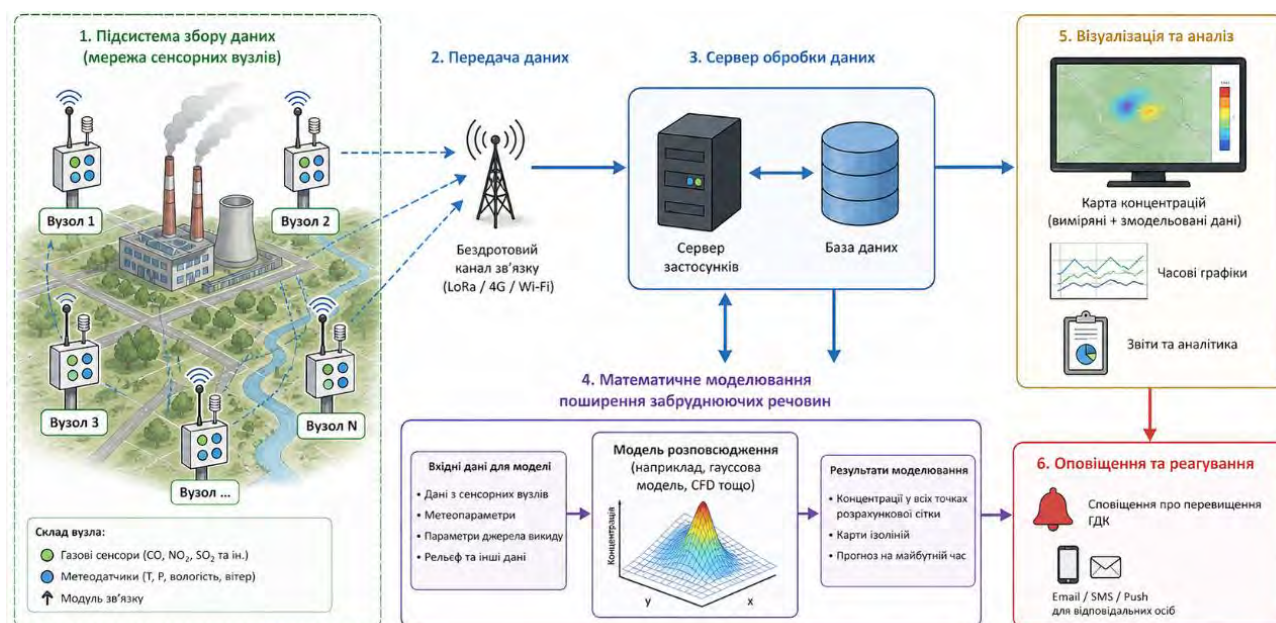


Рис. 1.2. Структура гібридної системи моніторингу якості повітря

У таких системах частина інформації береться прямо з датчиків, а інша частина визначається за допомогою розрахунків. Модель тут використовується для того, щоб оцінити концентрації там, де немає вимірювань. Це особливо корисно, коли мова йде про великі території або складні умови, де встановити багато сенсорів просто не виходить або це занадто дорого.

Перевага такого підходу в тому, що можна отримати більш цілісну картину. Якщо у звичайних розподілених системах є тільки окремі точки з даними, то тут можна оцінити ситуацію практично в будь-якому місці. Це допомагає точніше визначати ділянки з підвищеним рівнем забруднення і краще розуміти, як саме впливає джерело викидів [1], [2].

Також важливо, що такі системи дають можливість відслідковувати зміни з часом. Коли змінюються умови, наприклад робота обладнання або погода, модель дозволяє побачити, як це впливає на концентрації. Завдяки цьому можна не тільки оцінювати поточний стан, а й заздалегідь помічати потенційно небезпечні ситуації.

Ще один плюс полягає в тому, що немає потреби встановлювати велику кількість датчиків. Їх розміщують лише в ключових точках, а інші значення отримують через модель. Це зменшує витрати і спрощує обслуговування системи.

Але тут є і складність. Такі системи потребують більш серйозного налаштування. Потрібно правильно обрати математичну модель і підібрати її параметри. Якщо цього не зробити, точність результатів може бути низькою. Через це важливо опиратися на перевірені підходи і враховувати реальні умови роботи [3].

Якщо говорити про контроль повітря біля енергетичних об'єктів, то гібридний підхід виглядає одним із найефективніших. Він дозволяє поєднати реальні вимірювання з розрахунками, отримати більш повне уявлення про розподіл забруднення і вчасно виявляти перевищення допустимих рівнів.

1.3 Порівняльний аналіз систем моніторингу

Розподілені та гібридні системи вирішують одну й ту саму задачу, але підходять до неї по-різному. У першому випадку все будується на реальних вимірюваннях у точках, де встановлені датчики. У другому до цих даних додається ще й математична модель, яка розширює можливості аналізу.

Розподілені системи виглядають простішими з точки зору реалізації і дають надійні результати в конкретних місцях. Вони добре підходять, коли потрібно зафіксувати фактичні значення концентрацій або перевірити, чи є перевищення нормативів. Але їх слабке місце в тому, що вони не показують повної картини, бо між точками вимірювання інформації просто немає.

У гібридних системах ситуація інша. Тут за рахунок моделі можна оцінити стан повітря не тільки там, де стоять датчики, а й у будь-якій іншій точці. Це дає більш цілісне уявлення і допомагає точніше визначати ділянки з підвищеним рівнем забруднення [1], [2].

Якщо дивитися на витрати, то розподілені системи можуть обійтися дорожче, особливо коли потрібно покрити велику територію і встановити багато сенсорів. У гібридному підході кількість датчиків можна зменшити, але натомість ускладнюється програмна частина, бо потрібно реалізувати модель і правильно її налаштувати [7].

Також є різниця в тому, як системи працюють з часом. У гібридному варіанті простіше враховувати зміну умов і аналізувати динаміку процесу. У розподілених системах це більше залежить від того, як часто проводяться вимірювання.

Якщо говорити про моніторинг повітря біля енергетичних об'єктів, то гібридний підхід виглядає більш доцільним. Він поєднує реальні дані з можливостями моделювання, за рахунок чого дає більш повну і практичну оцінку ситуації.

1.4 Обґрунтування вимог до системи контролю якості повітря

Після аналізу існуючих підходів стає очевидно, що система контролю якості повітря не може обмежуватись лише збором даних. Вона має вміти їх обробляти, аналізувати і видавати результат, який реально можна використати для прийняття рішень. Тому при розробці важливо одразу визначити вимоги, які враховують як технічну сторону, так і особливості самого процесу поширення забруднень.

Передусім система повинна працювати постійно і регулярно збирати дані. Концентрація змінюється з часом, тому вимірювання потрібно виконувати з певним інтервалом, наприклад раз на 60 секунд. Це дає змогу бачити, як змінюється ситуація, і не пропускати моменти, коли рівень забруднення стає небезпечним.

Далі важливо, щоб система дозволяла оцінювати розподіл концентрацій у просторі. Для цього або використовують мережу датчиків, або підключають

математичну модель. У результаті можна отримати уявлення не тільки про окремі точки, а про всю територію, яка контролюється.

Не менш важливий момент це точність. Датчики мають працювати стабільно і покривати потрібний діапазон вимірювань, а сама система повинна враховувати похибки. Навіть невеликі відхилення можуть вплинути на висновок щодо перевищення допустимих рівнів.

Також потрібно, щоб збір і передача даних були узгоджені між собою. Потік інформації від датчиків не повинен перевантажувати канал зв'язку. Через це інтервал вимірювання і швидкість передачі підбираються так, щоб усе працювало без збоїв і затримок.

Окремо варто передбачити автоматичне визначення перевищення допустимих концентрацій. Система повинна не просто фіксувати числа, а аналізувати їх і сигналізувати, коли рівень забруднення стає небезпечним. Це вже інший рівень роботи, коли система не лише спостерігає, а й допомагає реагувати.

У сучасних умовах має сенс врахувати можливість використання рухомих датчиків. У такому випадку потрібна прив'язка до координат через GPS, щоб кожне вимірювання було пов'язане з конкретним місцем. Це робить дані більш інформативними.

Висновки до розділу 1

У розділі розглянуто основні підходи до моніторингу якості повітря, зокрема розподілені та гібридні системи. Показано, що розподілені системи забезпечують достовірні вимірювання в окремих точках, але не дають повної картини розподілу забруднення. Гібридні системи, у свою чергу, дозволяють поєднати вимірювання з моделюванням і отримати більш повну інформацію.

На основі проведеного аналізу сформульовано вимоги до системи контролю якості повітря. Встановлено, що така система повинна забезпечувати безперервний

збір даних, аналіз їх зміни у просторі та часі, автоматичне визначення перевищення гранично допустимих концентрацій, а також можливість використання мобільних датчиків із GPS-прив'язкою.

Отримані результати є основою для подальшого обґрунтування математичної моделі та розроблення структури автоматизованої системи моніторингу якості повітря.

2 ОБҐРУНТУВАННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ РОЗПОВСЮДЖЕННЯ ЗАБРУДНЮЮЧИХ РЕЧОВИН

У цьому розділі розглядається, як поведуться забруднюючі речовини після потрапляння в повітря і як цей процес можна описати через математику. Спочатку пояснюється сама суть явища, тобто що відбувається з викидом після його появи в атмосфері. Далі підбирається модель, яка дозволяє передати ці процеси у вигляді формул.

При підготовці даного розділу та формуванні математичної моделі розповсюдження забруднюючих речовин використано матеріали з джерел [1]–[3], а також нормативні документи щодо контролю якості атмосферного повітря [4], [5].

Основний акцент зроблено на гаусівській моделі. Вона досить зручна для інженерних розрахунків і при цьому не створює зайвої складності при реалізації. Окремо розглядаються параметри, які впливають на результат, а також умови, за яких така модель дає коректні результати.

Наприкінці розділу робиться оцінка того, наскільки цей підхід підходить для задач моніторингу якості повітря і чи можна використовувати його як основу для подальшого моделювання в MATLAB.

2.1 Фізичні основи процесу розповсюдження домішок

Після викиду забруднюючих речовин у атмосферу вони починають переміщуватися разом із повітряним потоком і одночасно розсіюватися. На цей процес впливають швидкість вітру, турбулентність повітря та висота джерела викиду. У результаті формується так званий факел викиду, який змінює свою форму та положення залежно від умов.

У загальному випадку концентрація забруднюючої речовини залежить від координат і часу, тобто може бути записана як (2.1):

$$C = C(x, y, z, t), \quad (2.1)$$

де x – відстань уздовж напрямку вітру;

y – поперечний напрямок,

z – висота;

t – час.

Основний процес, який описує поведінку домішок у повітрі, — це одночасно перенесення і розсіювання. Перенесення відбувається за рахунок вітру і описується просто (2.2):

$$x = ut, \quad (2.2)$$

де u – швидкість вітру.

Це означає, що домішка рухається в напрямку вітру з певною швидкістю.

Окрім переносу, важливу роль відіграє розсіювання. Воно виникає через турбулентні рухи повітря і призводить до того, що домішка поширюється в різні сторони. У спрощеному вигляді розсіювання можна описати через зростання розмірів факела (2.3):

$$\sigma_y = f(x), \quad \sigma_z = f(x), \quad (2.3)$$

де σ_y і σ_z – параметри, які показують, наскільки сильно домішка розширюється в горизонтальному і вертикальному напрямках.

Ще один важливий фактор – висота джерела викиду. Якщо джерело знаходиться на висоті H , то на початку домішка не одразу потрапляє на рівень землі. Це означає, що поблизу джерела концентрація біля поверхні може бути невеликою.

Загальна кількість речовини, яка потрапляє в атмосферу, визначається інтенсивністю викиду (2.4):

$$Q = \frac{m}{t}, \quad (2.4)$$

де Q – маса речовини за одиницю часу.

Цей параметр прямо впливає на рівень концентрації: чим більше викид, тим більша концентрація.

У результаті поєднання всіх цих факторів формується характерна залежність концентрації від відстані. Спочатку концентрація невелика, потім вона зростає і досягає максимуму, а далі зменшується через розсіювання.

Саме ці фізичні процеси лежать в основі побудови математичної моделі, яка буде розглянута далі.

2.2 Вибір математичної моделі (гаусівська модель)

Для побудови математичної моделі необхідно визначити параметри, які найбільше впливають на розповсюдження забруднюючих речовин. Саме вони задають умови розрахунку і визначають характер зміни концентрації.

Основними параметрами є інтенсивність викиду Q , швидкість вітру u , ефективна висота джерела H та відстань від джерела x . Окрім цього, для опису розсіювання використовуються коефіцієнти σ_y та σ_z , які змінюються залежно від відстані.

Для інженерних розрахунків ці коефіцієнти часто задаються у вигляді емпіричних залежностей (2.5):

$$\sigma_y(x) = ax^b, \quad \sigma_z(x) = cx^d, \quad (2.5)$$

де a, b, c, d – коефіцієнти, що залежать від стану атмосфери.

Такі залежності показують, що зі збільшенням відстані факел викиду розширюється, тобто забруднення поширюється на більшу область.

Для подальших розрахунків також вводиться поняття приземної концентрації, тобто концентрації на рівні землі (2.6):

$$C_{гр}(x) = C(x, y = 0, z = 0). \quad (2.6)$$

Цей параметр є ключовим, оскільки саме він використовується для оцінки впливу забруднення на людей і довкілля.

Ще одним важливим моментом є те, що максимум концентрації формується не біля джерела, а на деякій відстані від нього. Це пов'язано з тим, що факел викиду поступово опускається і розширюється. Положення максимуму можна умовно визначити як (2.7):

$$x_{max} \sim \frac{H}{\tan(\alpha)}, \quad (2.7)$$

де α – характеризує кут розповсюдження факела.

Це співвідношення показує, що при більшій висоті джерела зона максимального забруднення зміщується далі.

2.3 Основні параметри моделі та припущення

Після вибору математичної моделі необхідно визначити параметри, які використовуються при розрахунках. Саме вони задають конкретні умови, в яких виконується моделювання.

До основних параметрів належать:

- інтенсивність викиду Q , яка визначає кількість речовини, що надходить у атмосферу;
- швидкість вітру u , від якої залежить перенесення домішки;
- ефективна висота джерела H ;
- відстань від джерела x , на якій визначається концентрація.

Для задач моніторингу важливо, що концентрація розглядається на рівні землі, тобто (2.8):

$$C_{\text{гр}}(x) = C(x, 0, 0). \quad (2.8)$$

Це дозволяє оцінити вплив забруднення на людей і навколишнє середовище.

Для спрощення розрахунків у моделі приймаються такі припущення:

- джерело викиду розглядається як точкове;
- викид є безперервним;
- напрямок вітру не змінюється;
- параметри атмосфери вважаються сталими на розрахунковому інтервалі;
- не враховуються хімічні реакції між домішками;
- не враховується осадження забруднюючих речовин;
- вплив рельєфу та забудови не розглядається.

Такі припущення дозволяють суттєво спростити модель і зробити її придатною для подальшої реалізації у MATLAB.

2.4 Придатність моделі для задач моніторингу якості повітря

Після визначення параметрів і формування моделі важливо оцінити, наскільки вона підходить для практичного використання в системі моніторингу. Тут головне не тільки точність, а й зручність реалізації та швидкість розрахунків.

Однією з основних вимог є можливість оперативного отримання результатів. У задачах моніторингу система повинна працювати в режимі, близькому до реального часу. Для цього модель має бути достатньо простою, щоб обчислення виконувались швидко, без складних і ресурсоємних алгоритмів.

Ще одним важливим моментом є можливість автоматичного визначення небезпечних ситуацій. Для цього вводиться умова перевищення (2.9):

$$C > C_{\text{ГДК}}, \quad (2.9)$$

де $C_{\text{ГДК}}$ – допустиме значення концентрації для конкретної речовини.

Ця умова легко перевіряється програмно і може використовуватися як основа для побудови системи сигналізації.

У практичних задачах часто виникає необхідність оцінити загальний рівень забруднення від декількох речовин одночасно. У такому випадку використовується інтегральний показник (2.10):

$$I = \sum_{i=1}^n \frac{C_i}{C_{\text{ГДК},i}}, \quad (2.10)$$

де n – кількість контрольованих речовин.

Такий підхід дозволяє оцінити сумарний вплив декількох домішок і використовується для більш повного аналізу екологічного стану.

З точки зору реалізації в MATLAB важливо, що модель дозволяє працювати з масивами даних. Наприклад, концентрація може обчислюватися одразу для набору значень (2.11):

$$C = [C_1, C_2, \dots, C_n]. \quad (2.11)$$

Це дає змогу швидко будувати графіки та аналізувати результати без додаткових обчислювальних витрат.

Ще однією перевагою є можливість інтеграції моделі з реальною системою збору даних. Результати вимірювань від датчиків можуть використовуватися як вхідні параметри, а сама модель – для оцінки ситуації в інших точках простору.

Разом із цим потрібно враховувати, що модель має обмеження. Вона не описує складні атмосферні процеси, але для задач моніторингу цього рівня це є допустимим. Головне, що вона дозволяє отримати зрозумілий і швидкий результат.

Висновки до розділу 2

У цьому розділі розібрано, як саме поширюються забруднюючі речовини в атмосфері і від чого це залежить. Пояснюється, які фактори найбільше впливають на цей процес, і на цій основі обирається математична модель, яка дозволяє описати його без зайвого ускладнення, але з достатньою точністю.

Окремо визначені параметри, від яких залежить результат, і сформульовані умови, за яких модель можна застосовувати для інженерних розрахунків. Це спрощує подальшу роботу і дозволяє без проблем реалізувати її програмно.

Показано, що обрана модель, яка утворена виразами 2.1 – 2.11, підходить для задач контролю якості повітря. Вона дає можливість оцінювати концентрації, відслідковувати їх зміну і визначати моменти, коли значення виходять за допустимі межі.

У підсумку отримані результати можна використовувати як основу для подальшої розробки структури автоматизованої системи і реалізації моделювання в MATLAB.

3 РОЗРОБЛЕННЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ ЯКОСТІ ПОВІТРЯ

У цьому розділі показано, як саме будується система моніторингу якості повітря і за яким принципом вона працює. Розглядається її загальна структура, з чого вона складається і як взаємодіють окремі елементи між собою.

Більше уваги приділяється датчикам, їх параметрам і точності вимірювань, бо від цього напряму залежить якість отриманих даних. Також описується, як організований збір і передача інформації, в якому режимі працює система і які є обмеження по швидкості.

Додатково враховано використання GPS-трекерів. Це дозволяє підключати рухомі датчики і отримувати більш повну картину стану повітря на різних ділянках.

3.1 Загальна структура системи моніторингу

Для узагальнення структури системи її роботу доцільно представити у вигляді блок-схеми, яка відображає послідовність обробки даних. Така схема наведена на рисунку 3.1.

Структурна схема автоматизованої системи моніторингу якості повітря відображає послідовність взаємодії основних функціональних елементів системи. Схема побудована за лінійним принципом обробки даних, що дозволяє чітко прослідкувати шлях інформації від моменту її вимірювання до отримання кінцевого результату.

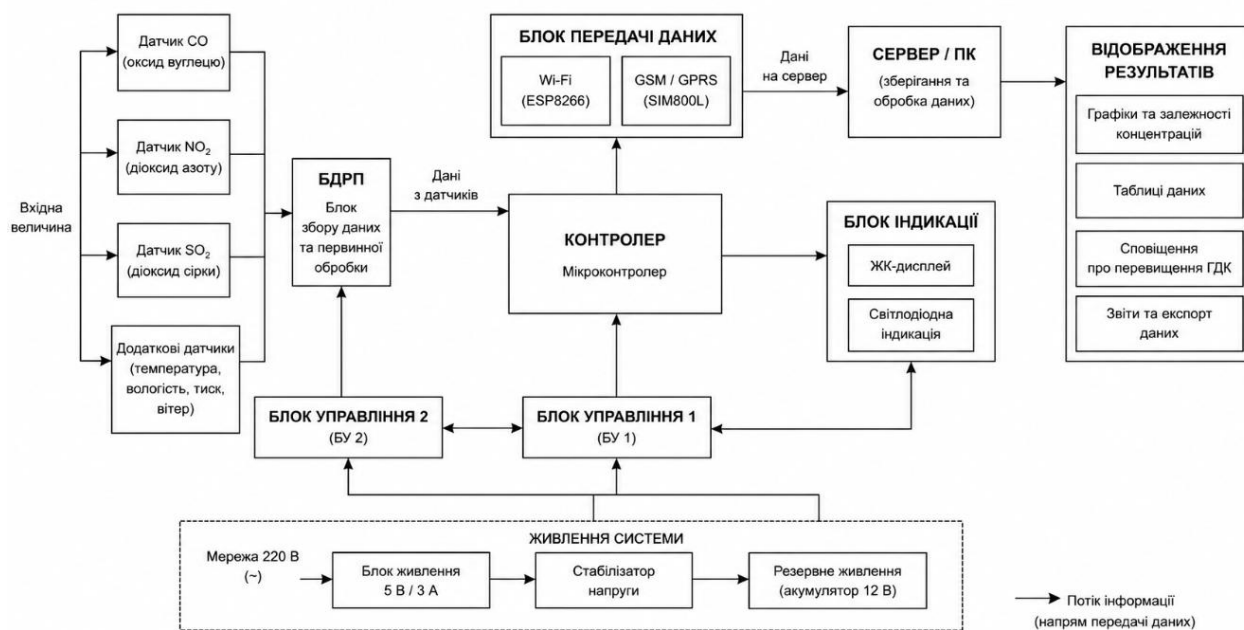


Рис. 3.1. Структурна схема автоматизованої системи моніторингу якості повітря

Відображення результатів, яке забезпечує представлення отриманої інформації у вигляді графіків, залежностей та текстових повідомлень. Це дозволяє користувачу швидко оцінити стан повітря, визначити наявність перевищень ГДК та прийняти відповідні рішення. Приклад відображення результатів наведено на рисунку 3.2.

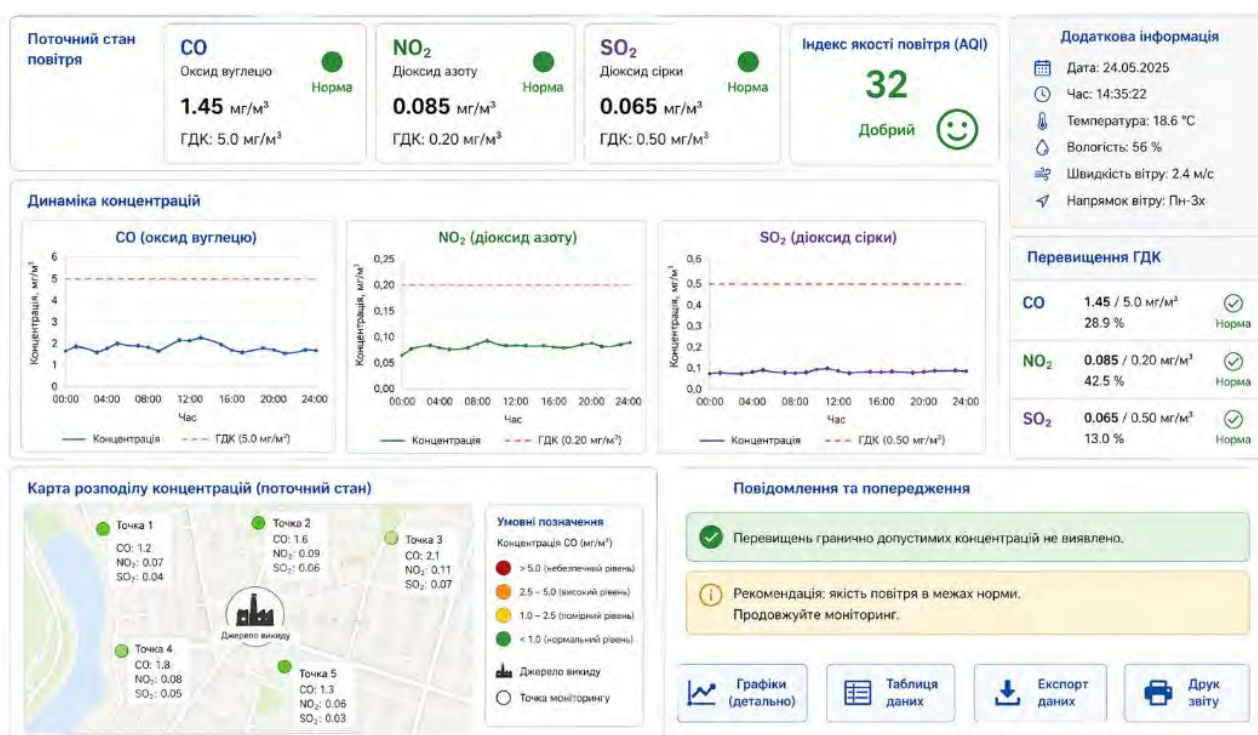


Рис. 3.2. Відображення результатів моніторингу

3.2 Датчики контролю якості повітря та їх технічні характеристики.

Одним із ключових елементів системи моніторингу є датчики, які безпосередньо вимірюють концентрацію забруднюючих речовин. Від їх точності та стабільності роботи залежить якість усієї системи (рис. 3.3).

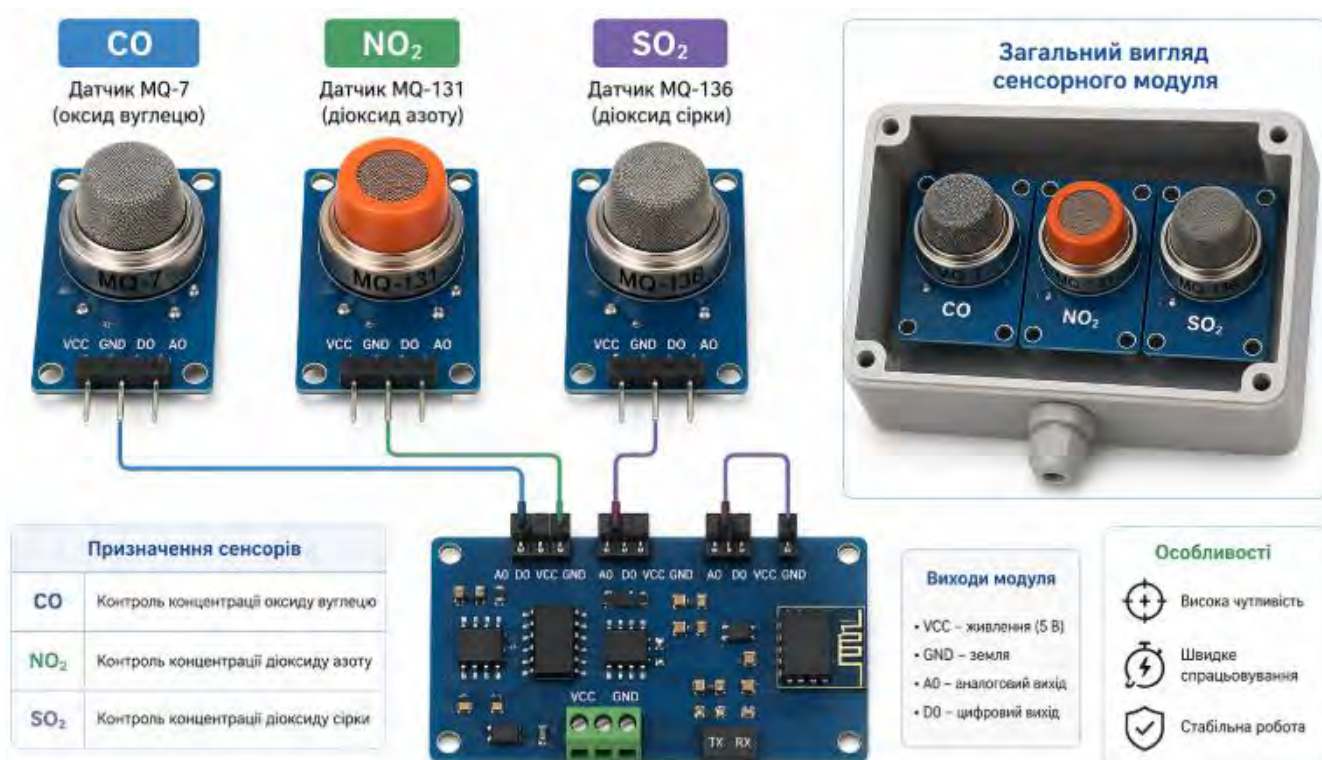


Рис. 3.3. Датчики контролю концентрацій забруднюючих речовин

Для контролю якості повітря у даній роботі розглядаються датчики для вимірювання CO, NO₂ та SO₂. Найчастіше використовуються електрохімічні або напівпровідникові сенсори, які реагують на зміну концентрації газу та формують електричний сигнал.

Основні технічні характеристики датчиків включають діапазон вимірювання, чутливість та похибку. Діапазон визначає мінімальні та максимальні значення концентрації, які може вимірювати сенсор. Чутливість показує, наскільки сильно змінюється вихідний сигнал при зміні концентрації газу.

Залежність вихідного сигналу від концентрації можна записати у вигляді (3.1):

$$S = kC, \quad (3.1)$$

де S – вихідний сигнал датчика;

k – коефіцієнт чутливості;

C – концентрація газу.

Це означає, що при збільшенні концентрації сигнал зростає пропорційно.

Для практичного використання важливо враховувати похибку вимірювання (3.2):

$$\Delta C = \pm \varepsilon C, \quad (3.2)$$

де ε – відносна похибка датчика.

3.3 Організація збору, передачі та обробки даних

Далі в системі використовується контролер, який відповідає за збір і первинну обробку даних. Він отримує сигнали від датчиків, переводить їх у цифровий вигляд і може виконувати базову обробку, наприклад фільтрацію або перевірку, чи коректні значення. У деяких випадках контролер ще й узгоджує вимірювання в часі та формує дані у вигляді пакетів для подальшої передачі. Приклад такого пристрою показаний на рисунку 3.4.

Як показано на рисунку 3.4, контролер виконує роль центрального вузла апаратної частини системи, об'єднуючи сенсорний рівень із підсистемою передачі даних.

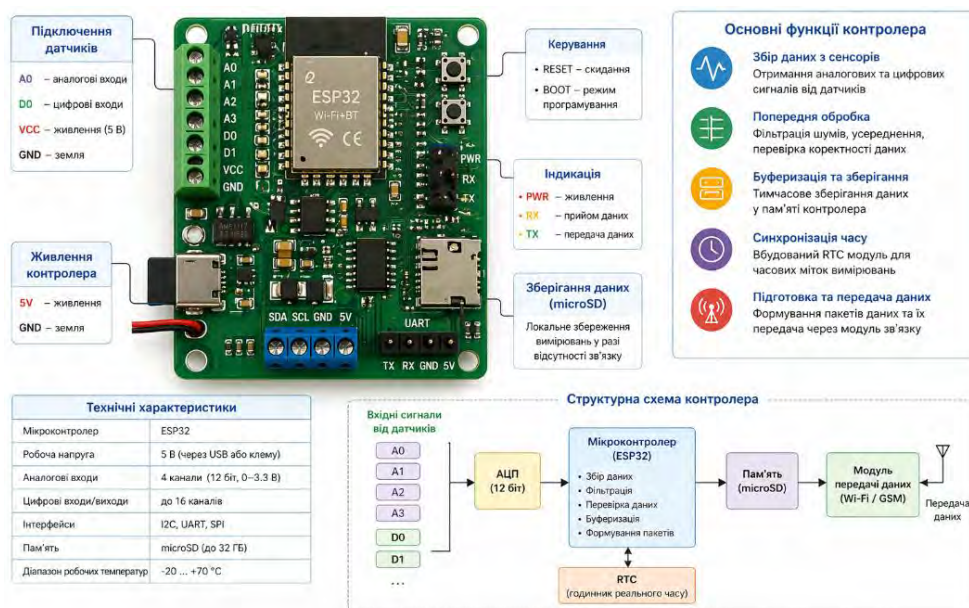


Рис. 3.4. Контролер збору та первинної обробки даних

Передача даних є наступним важливим етапом функціонування системи. Вона забезпечує доставку інформації від контролера до обчислювального середовища. У сучасних системах для цього можуть використовуватися різні технології, зокрема Wi-Fi, GSM або інші бездротові протоколи. Вибір способу передачі залежить від умов експлуатації, відстані та вимог до швидкодії системи. Приклад модуля передачі даних наведено на рисунку 3.5.

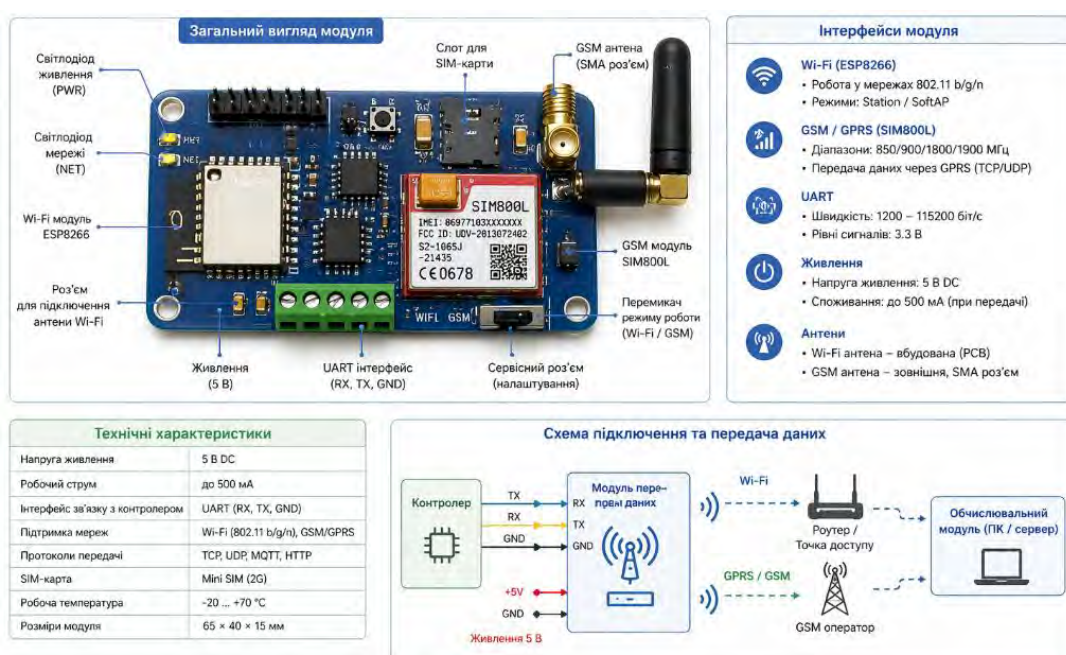


Рис. 3.5. Модуль передачі даних

Як видно з рисунка 3.5, цей елемент забезпечує інтеграцію апаратної частини системи з програмним середовищем, що дозволяє виконувати подальший аналіз даних.

Обробка даних виконується у середовищі MATLAB, яке виступає обчислювальним ядром системи. На цьому етапі реалізується математична модель розповсюдження забруднюючих речовин, виконуються чисельні розрахунки концентрацій та аналіз їх залежностей від відстані і часу. Крім того, саме на цьому рівні визначається перевищення гранично допустимих концентрацій та формується аналітична інформація. Приклад роботи середовища MATLAB наведено на рисунку 3.6.

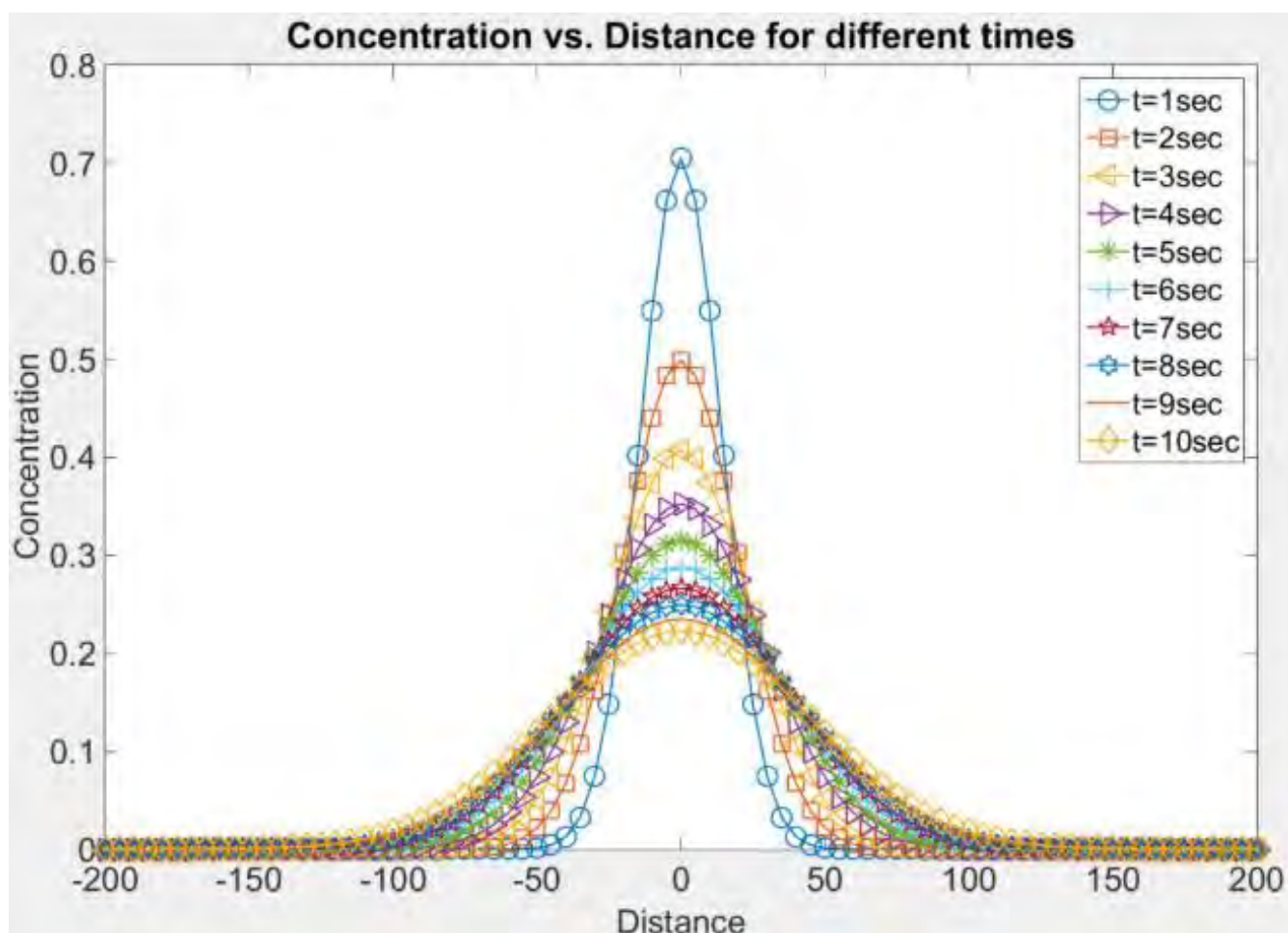


Рис. 3.6. Обробка даних у середовищі MATLAB

Як показано на рисунку 3.6, MATLAB дозволяє не лише виконувати розрахунки, а й здійснювати візуалізацію результатів, що є важливою складовою системи моніторингу.

3.4 Використання GPS-трекерів у системі моніторингу (рухомі платформи)

У сучасних системах моніторингу якості повітря доцільно використовувати не лише стаціонарні датчики, а й рухомі платформи. Це дозволяє отримувати дані з різних ділянок території та більш повно оцінювати стан повітря.

Для реалізації такого підходу використовуються GPS-трекери, які забезпечують визначення координат датчика в кожний момент часу. У результаті кожне вимірювання прив'язується до конкретного місця, що дозволяє аналізувати розподіл концентрацій не тільки за значенням, а й у просторі (рис. 3.7).

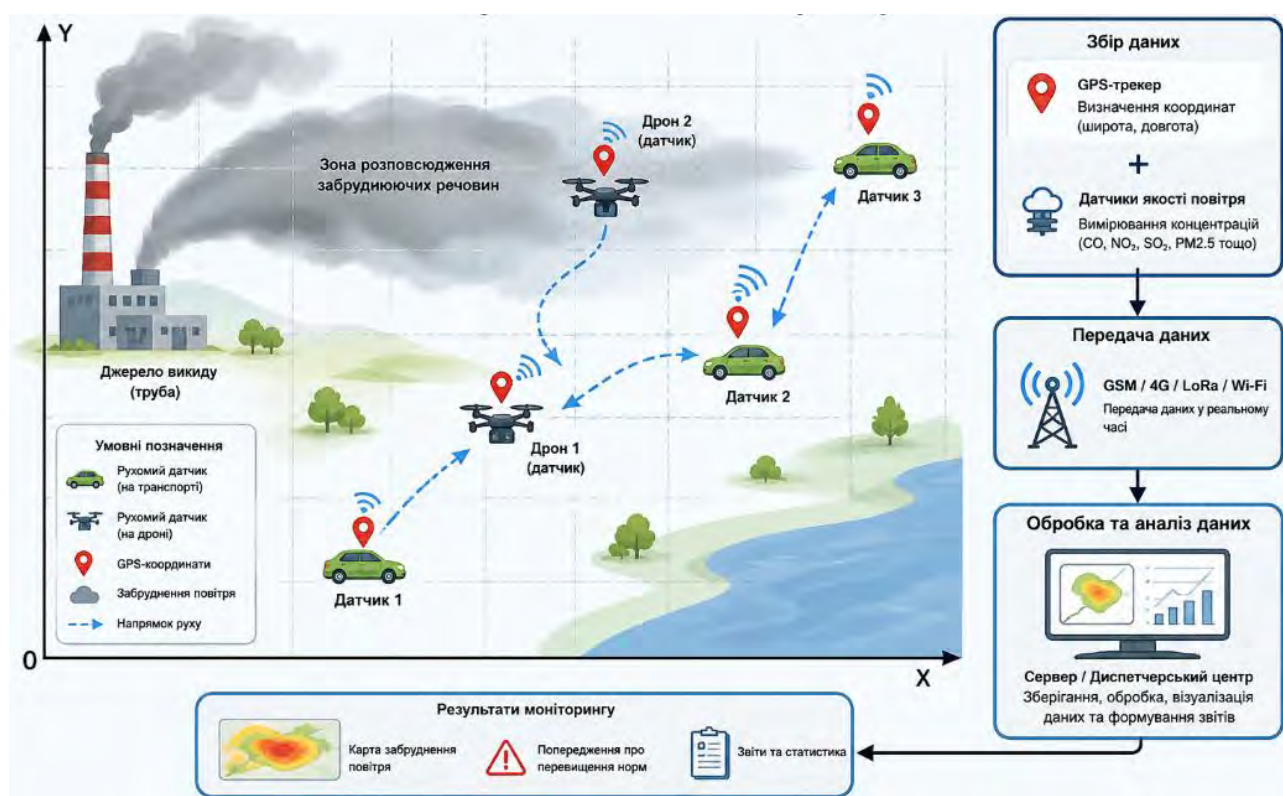


Рис. 3.7. Схема моніторингу якості повітря з використанням GPS-трекерів

Координати датчика можуть бути записані у вигляді (3.3):

$$(x(t), y(t)), \quad (3.3)$$

де $x(t)$ та $y(t)$ – положення датчика у певний момент часу.

Якщо датчик рухається, то його положення змінюється з часом, а разом із ним змінюється і точка вимірювання. Це дозволяє отримувати набір даних у різних точках без необхідності встановлення великої кількості стаціонарних сенсорів.

Рух датчика можна описати як (3.4):

$$v = \frac{\Delta s}{\Delta t}, \quad (3.4)$$

де v – швидкість переміщення платформи.

Це важливо враховувати, оскільки при великій швидкості датчик може не встигати виконувати вимірювання з потрібною точністю.

У системі моніторингу кожне вимірювання формується разом із координатами:

$$D_i = (C_i, x_i, y_i, t_i). \quad (3.5)$$

Такий формат даних дозволяє будувати карти розподілу забруднення та аналізувати зміну концентрацій у просторі.

Використання рухомих платформ має ряд переваг. По-перше, зменшується кількість необхідних датчиків. По-друге, можна досліджувати важкодоступні або великі території. По-третє, підвищується інформативність системи.

Разом із цим потрібно враховувати і обмеження. Рух датчика може впливати на точність вимірювань, а також виникає необхідність синхронізації даних у часі. Крім того, важливо правильно обрати інтервал вимірювання, щоб отримати достатню деталізацію без перевантаження системи.

Висновки до розділу 3

У цьому розділі побудовано структуру автоматизованої системи моніторингу якості повітря і визначено, з яких елементів вона складається. Показано, як налагодити взаємодію між датчиками, каналами передачі даних і середовищем, де відбувається обробка.

Розглянуто датчики, які використовуються для контролю якості повітря, їх характеристики і принцип роботи. Звертається увага на те, що точність і стабільність результатів напряму залежать від того, які сенсори обрані і як вони працюють.

Описано, як саме організований збір, передача і обробка інформації. Визначено, що циклічний режим вимірювань дозволяє отримувати потрібні дані без зайвого навантаження на систему.

Окремо розглянуто використання GPS-трекерів. Це дає можливість працювати з рухомими датчиками і отримувати дані з різних точок, а не тільки з фіксованих місць. За рахунок цього з'являється можливість аналізувати забруднення не тільки в окремих точках, а по всій території.

У підсумку сформована структура системи, яка забезпечує збір, передачу і аналіз даних та може слугувати основою для подальшого моделювання і реалізації в MATLAB.

4 МЕТОДИ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ РОЗПОВСЮДЖЕННЯ ЗАБРУДНЮЮЧИХ РЕЧОВИН

У цьому розділі вже розглядається саме моделювання поширення забруднюючих речовин у повітрі. Основний акцент зроблено на тому, як отримати залежність концентрації від відстані і часу на основі вибраної моделі. Це дозволяє перейти від простої теорії до реальних розрахунків, які можна використати на практиці.

Окремо розбирається, як на результат впливають ключові параметри, такі як швидкість вітру, висота джерела викиду і його інтенсивність. За рахунок цього можна побачити, як змінюється концентрація в різних умовах і де саме можуть виникати ділянки з підвищеним рівнем забруднення. Отримані результати далі використовуються для реалізації алгоритмів контролю і відображення даних у MATLAB.

4.1 Загальні вимоги до моделювання

Моделювання поширення забруднюючих речовин має відповідати певним вимогам, щоб результати були адекватними і їх можна було використати в системі моніторингу. У цій роботі робиться акцент на тому, щоб модель не була занадто складною, але при цьому давала достатньо точні результати і нормально працювала в MATLAB.

Перше, що важливо, це можливість розраховувати концентрацію в просторі. Модель повинна дозволяти визначати значення на різних відстанях від джерела викиду. Це потрібно для того, щоб бачити, як розподіляється забруднення і де воно досягає найбільших значень.

Друга вимога пов'язана з часом. У реальних умовах параметри не залишаються постійними, наприклад може змінюватися інтенсивність викиду або швидкість вітру. Тому модель має враховувати залежність параметрів від часу (4.1):

$$P = P(t), \quad (4.1)$$

де P – довільний параметр системи.

Це дозволяє аналізувати динаміку процесу і досліджувати поведінку концентрації протягом певного інтервалу часу.

Ще однією вимогою є можливість роботи з масивами даних. Для ефективного моделювання необхідно обчислювати значення одразу для набору точок (4.2):

$$x = [x_1, x_2, \dots, x_n]. \quad (4.2)$$

Це дає змогу будувати графіки та виконувати аналіз без зайвих обчислень.

Також модель повинна дозволяти автоматично визначати небезпечні значення. Результати мають бути у такому вигляді, щоб їх можна було легко порівняти з нормативами і зрозуміти, чи є перевищення.

Окремо варто врахувати швидкість обчислень. Модель повинна працювати достатньо швидко, щоб її можна було використовувати майже в реальному часі, без великих затримок.

4.2 Моделювання розповсюдження у просторі

Моделювання розповсюдження забруднюючих речовин у просторі виконується для того, щоб визначити, як змінюється концентрація газів при віддаленні від джерела викиду. У даній роботі розглядається напрямок поширення факела вздовж осі x , тобто від труби енергетичного об'єкта до контрольованої території.

Для просторового моделювання задається діапазон відстаней (4.3):

$$x = x_{min} : \Delta x : x_{max}. \quad (4.3)$$

У межах моделювання приймається, що концентрація визначається для приземного шару повітря. Для кожного значення відстані розраховуються параметри розсіювання, після чого визначаються концентрації CO, NO₂ та SO₂. Оскільки для кожного газу задається своя інтенсивність викиду, отримуються три окремі залежності.

Для зручності програмної реалізації у MATLAB відстань задається у вигляді вектора. Це дозволяє виконувати розрахунок не для однієї точки, а одразу для всього діапазону значень. Такий підхід зручний для побудови графіків і визначення ділянок, де концентрація набуває найбільших значень.

Нижче наведено код MATLAB для моделювання просторового розподілу концентрацій CO, NO₂ та SO₂ (рис. 4.1-4.2). Результат моделювання на рисунку 4.3.

```
>> format compact
close all

% Моделювання розповсюдження забруднюючих речовин у просторі

% Вихідні дані
Q_CO = 120;      % інтенсивність викиду CO, г/с
Q_NO2 = 80;      % інтенсивність викиду NO2, г/с
Q_SO2 = 150;     % інтенсивність викиду SO2, г/с

u = 5;          % швидкість вітру, м/с
H = 60;         % ефективна висота джерела, м

% Діапазон відстаней
x_min = 100;    % м
x_max = 2000;   % м
dx = 10;        % крок, м

x = x_min:dx:x_max;

% Параметри розсіювання
sigma_y = 0.22 .* x .* (1 + 0.0001 .* x).^(-0.5);
sigma_z = 0.20 .* x;

% Розрахунок концентрацій у приземному шарі
% Переведення г/с у мг/с виконується множенням на 1000
C_CO = (Q_CO .* 1000) ./ (pi .* u .* sigma_y .* sigma_z .* exp(-(H.^2)...
./ (2 .* sigma_z.^2)));
C_NO2 = (Q_NO2 .* 1000) ./ (pi .* u .* sigma_y .* sigma_z .* exp(-(H.^2)...
./ (2 .* sigma_z.^2)));
C_SO2 = (Q_SO2 .* 1000) ./ (pi .* u .* sigma_y .* sigma_z .* exp(-(H.^2)...
./ (2 .* sigma_z.^2)));
```

Рис. 4.1. Код MATLAB для моделювання просторового розподілу концентрацій. Ч.1

```

% Визначення максимальних концентрацій
[Cmax_CO, ind_CO] = max(C_CO);
[Cmax_NO2, ind_NO2] = max(C_NO2);
[Cmax_SO2, ind_SO2] = max(C_SO2);

xmax_CO = x(ind_CO);
xmax_NO2 = x(ind_NO2);
xmax_SO2 = x(ind_SO2);

% Виведення результатів
fprintf('--- Просторове моделювання концентрацій ---\n');
fprintf('CO: максимальна концентрація %.4f мг/м^3 на відстані %.0f м\n',...
Cmax_CO, xmax_CO);
fprintf('NO2: максимальна концентрація %.4f мг/м^3 на відстані %.0f м\n',...
Cmax_NO2, xmax_NO2);
fprintf('SO2: максимальна концентрація %.4f мг/м^3 на відстані %.0f м\n',...
Cmax_SO2, xmax_SO2);

% Побудова графіка
figure
plot(x, C_CO, 'r', 'LineWidth', 2)
hold on
plot(x, C_NO2, 'b', 'LineWidth', 2)
plot(x, C_SO2, 'g', 'LineWidth', 2)

plot(xmax_CO, Cmax_CO, 'ro', 'MarkerSize', 8, 'LineWidth', 2)
plot(xmax_NO2, Cmax_NO2, 'bo', 'MarkerSize', 8, 'LineWidth', 2)
plot(xmax_SO2, Cmax_SO2, 'go', 'MarkerSize', 8, 'LineWidth', 2)

grid on
xlabel('Відстань від джерела, м')
ylabel('Концентрація, мг/м^3')
title('Моделювання розповсюдження забруднюючих речовин у просторі')
legend('CO', 'NO_2', 'SO_2', 'max CO', 'max NO_2', 'max SO_2')

% Підписи максимумів
text(xmax_CO, Cmax_CO, [' CO max = ' num2str(Cmax_CO, '%.3f')])
text(xmax_NO2, Cmax_NO2, [' NO2 max = ' num2str(Cmax_NO2, '%.3f')])
text(xmax_SO2, Cmax_SO2, [' SO2 max = ' num2str(Cmax_SO2, '%.3f')])
--- Просторове моделювання концентрацій ---
CO: максимальна концентрація 1.4339 мг/м^3 на відстані 210 м
NO2: максимальна концентрація 0.9559 мг/м^3 на відстані 210 м
SO2: максимальна концентрація 1.7924 мг/м^3 на відстані 210 м

```

Рис. 4.2. Код MATLAB для моделювання просторового розподілу концентрацій. Ч.2

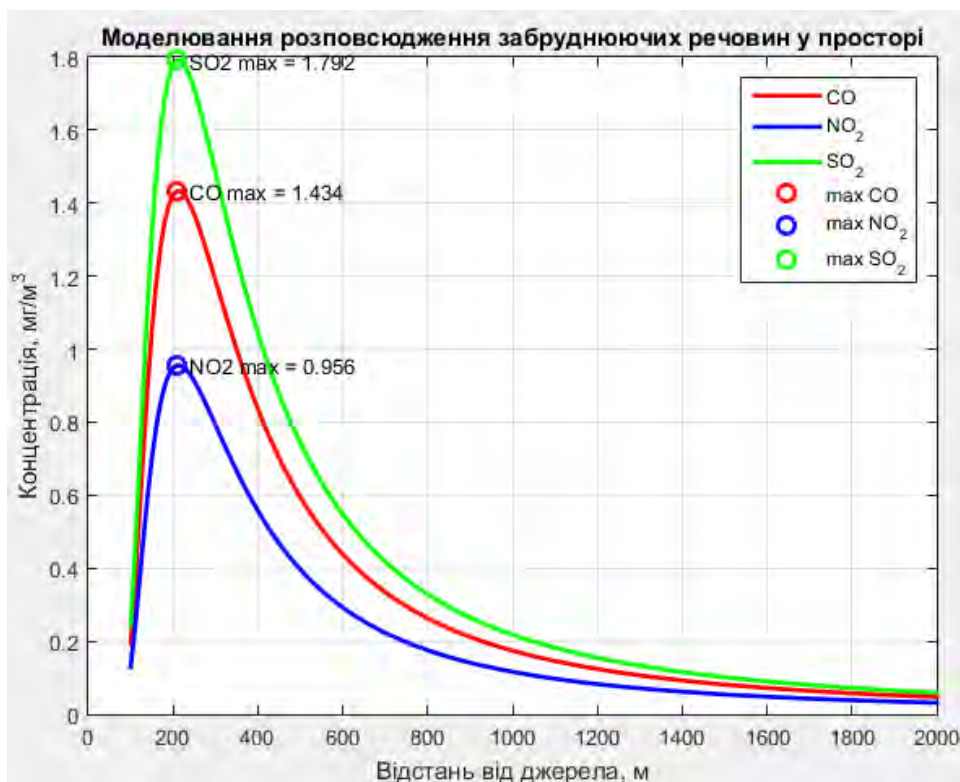


Рис. 4.3. Моделювання розповсюдження забруднюючих речовин у просторі

4.3 Моделювання зміни концентрації у часі

Окрім просторового розподілу, для системи моніторингу важливо враховувати зміну концентрації у часі. Це дозволяє оцінити, як поводить себе рівень забруднення при зміні умов, наприклад швидкості вітру або інтенсивності викиду.

Для моделювання вводиться часовий інтервал (4.4):

$$t = t_{min} : \Delta t : t_{max}. \quad (4.4)$$

У даному випадку концентрація розраховується в одній фіксованій точці, наприклад на відстані $x = 500$ м від джерела. Це дозволяє відслідковувати, як змінюється рівень забруднення в часі.

Для імітації реальних умов параметри задаються як функції часу. Наприклад (4.5):

$$u(t) = u_0 + \Delta u \sin(\omega t), \quad (4.5)$$

де $u(t)$ – швидкість вітру в момент часу;

u_0 – середнє значення;

Δu – амплітуда зміни.

Такий підхід дозволяє врахувати коливання погодних умов. Нижче наведено код MATLAB для моделювання зміни концентрації у часі (рис. 4.4-4.5). Результат моделювання на рисунку 4.6.

```
>> format compact
close all

% Моделювання зміни концентрації у часі

% Вихідні дані
Q_CO = 120;
Q_NO2 = 80;
Q_SO2 = 150;

u0 = 5;           % середня швидкість вітру
du = 2;           % амплітуда зміни

H = 60;
x = 500;          % фіксована відстань

% Час
t_min = 0;
t_max = 24;
dt = 0.2;

t = t_min:dt:t_max;

% Зміна швидкості вітру у часі
u = u0 + du .* sin(2*pi .* t / 24);

% Параметри розсіювання
sigma_y = 0.22 .* x .* (1 + 0.0001 .* x).^(-0.5);
sigma_z = 0.20 .* x;

% Розрахунок концентрацій
C_CO = (Q_CO .* 1000) ./ (pi .* u .* sigma_y .* sigma_z .* exp(-(H.^2)...
./ (2 .* sigma_z.^2)));
C_NO2 = (Q_NO2 .* 1000) ./ (pi .* u .* sigma_y .* sigma_z .* exp(-(H.^2)...
./ (2 .* sigma_z.^2)));
C_SO2 = (Q_SO2 .* 1000) ./ (pi .* u .* sigma_y .* sigma_z .* exp(-(H.^2)...
./ (2 .* sigma_z.^2)));

% Пошук максимумів
[Cmax_CO, ind_CO] = max(C_CO);
[Cmax_NO2, ind_NO2] = max(C_NO2);
[Cmax_SO2, ind_SO2] = max(C_SO2);
```

Рис. 4.4. Код MATLAB для моделювання зміни концентрації у часі. Ч.1

```

tmax_CO = t(ind_CO);
tmax_NO2 = t(ind_NO2);
tmax_SO2 = t(ind_SO2);

% Виведення
fprintf('--- Часове моделювання ---\n');
fprintf('CO: max %.3f мг/м^3 у момент часу %.2f год\n', Cmax_CO, tmax_CO);
fprintf('NO2: max %.3f мг/м^3 у момент часу %.2f год\n', Cmax_NO2, tmax_NO2);
fprintf('SO2: max %.3f мг/м^3 у момент часу %.2f год\n', Cmax_SO2, tmax_SO2);

% Графік
figure
plot(t, C_CO, 'r', 'LineWidth', 2)
hold on
plot(t, C_NO2, 'b', 'LineWidth', 2)
plot(t, C_SO2, 'g', 'LineWidth', 2)

plot(tmax_CO, Cmax_CO, 'ro', 'LineWidth', 2)
plot(tmax_NO2, Cmax_NO2, 'bo', 'LineWidth', 2)
plot(tmax_SO2, Cmax_SO2, 'go', 'LineWidth', 2)

grid on
xlabel('Час, год')
ylabel('Концентрація, мг/м^3')
title('Моделювання зміни концентрації у часі (x = 500 м)')
legend('CO', 'NO_2', 'SO_2')

text(tmax_CO, Cmax_CO, [' CO max = ' num2str(Cmax_CO, '%.3f')])
text(tmax_NO2, Cmax_NO2, [' NO2 max = ' num2str(Cmax_NO2, '%.3f')])
text(tmax_SO2, Cmax_SO2, [' SO2 max = ' num2str(Cmax_SO2, '%.3f')])
--- Часове моделювання ---
CO: max 0.991 мг/м^3 у момент часу 18.00 год
NO2: max 0.660 мг/м^3 у момент часу 18.00 год
SO2: max 1.238 мг/м^3 у момент часу 18.00 год

```

Рис. 4.5. Код MATLAB для моделювання зміни концентрації у часі. Ч.2

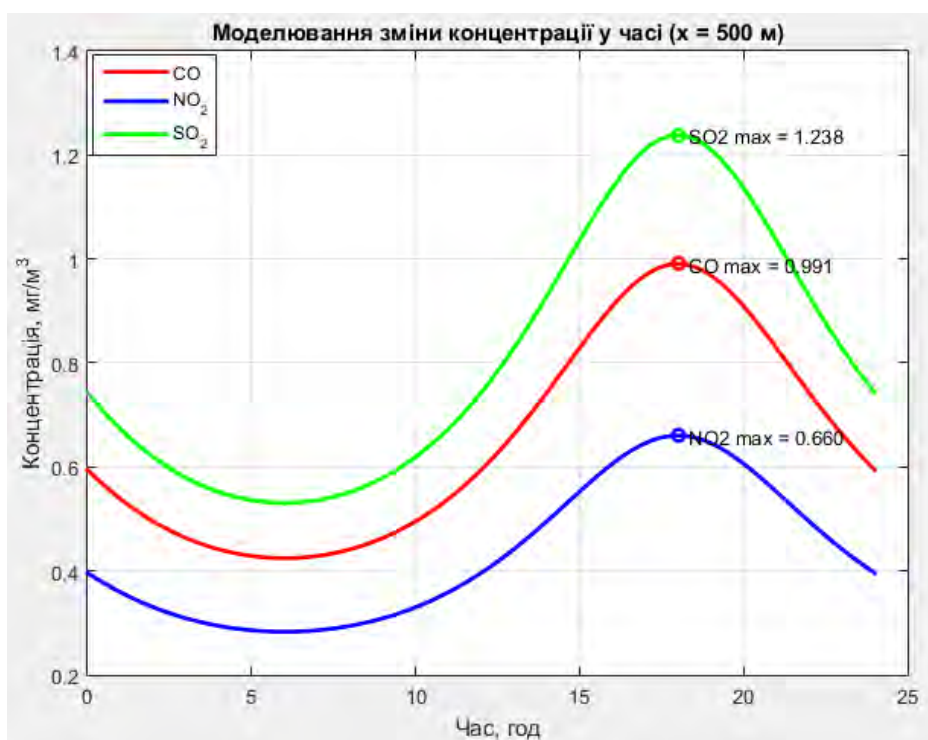


Рис. 4.6. Моделювання зміни концентрації у часі при $x = 500$ м

4.4 Визначення моментів перевищення гранично допустимих концентрацій

Однією з ключових задач системи моніторингу є не просто розрахунок концентрацій, а визначення моментів, коли вони перевищують допустимі значення. Це дозволяє оперативно виявляти небезпечні ситуації і формувати відповідні сигнали.

Для кожної забруднюючої речовини задається гранично допустима концентрація $C_{ГДК}$. Перевищення фіксується у випадку, якщо виконується умова:

де C_i – поточне значення концентрації.

Для автоматизації цього процесу формується логічний масив (4.6):

$$L_i = \begin{cases} 1, & C_i > C_{ГДК} \\ 0, & C_i \leq C_{ГДК} \end{cases} \quad (4.6)$$

Це дозволяє визначити, у які моменти часу або на яких відстанях спостерігається перевищення.

Для більш детального аналізу вводиться коефіцієнт перевищення (4.7):

$$K_i = \frac{C_i}{C_{ГДК}}. \quad (4.7)$$

Якщо $K_i > 1$, то це означає перевищення допустимого рівня. Чим більше значення коефіцієнта, тим більш небезпечною є ситуація.

Для визначення моменту першого перевищення використовується:

$$t_{кр} = t_j. \quad (4.8)$$

Це дозволяє визначити час, коли вперше виникає небезпечна ситуація.

Нижче наведено код MATLAB для реалізації алгоритму визначення перевищення ГДК у часі (рис. 4.7). Результат моделювання на рисунку 4.8.

```

>> format compact
close all

% Дані (приклад для CO)
C = C_CO;      % масив концентрацій (з попереднього розрахунку)
t = t;         % масив часу

C_GDK = 5;     % гранично допустима концентрація (мг/м^3)

% Коефіцієнт перевищення
K = C ./ C_GDK;

% Логічний масив перевищення
L = C > C_GDK;

% Пошук першого перевищення
ind = find(L == 1, 1);

if isempty(ind)
    fprintf('Перевищення не виявлено\n');
else
    t_crit = t(ind);
    fprintf('Перше перевищення у момент часу %.2f год\n', t_crit);
end

% Графік
figure
plot(t, C, 'b', 'LineWidth', 2)
hold on
plot(t, C_GDK .* ones(size(t)), 'r--', 'LineWidth', 2)

% Позначення перевищення
plot(t(L), C(L), 'ro')

grid on
xlabel('Час, год')
ylabel('Концентрація, мг/м^3')
title('Визначення перевищення ГДК')
legend('Концентрація', 'ГДК', 'Перевищення')
Перевищення не виявлено

```

Рис. 4.7. Код MATLAB для реалізації алгоритму визначення перевищення ГДК у часі

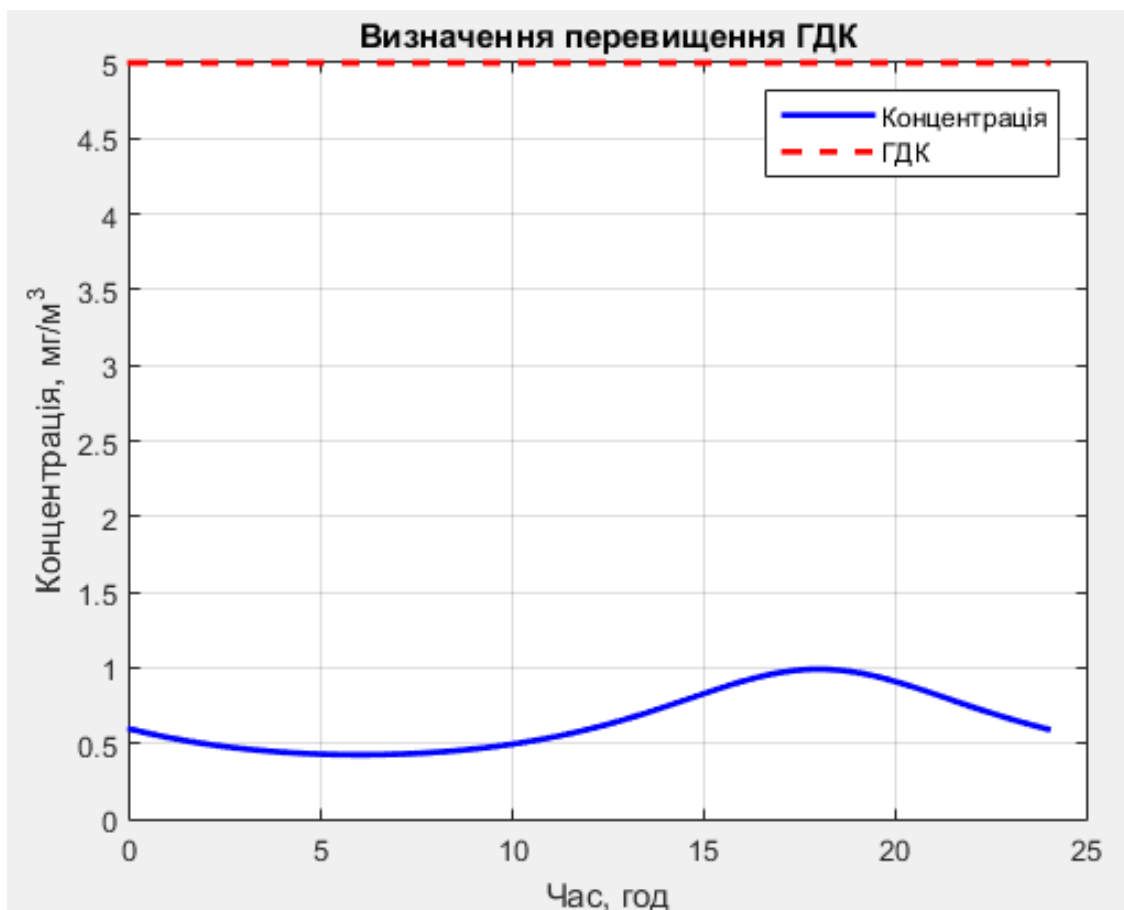


Рис. 4.8. Визначення перевищення ГДК

У результаті виконання програми визначаються моменти перевищення допустимих значень, а також будується графік із позначенням небезпечних ділянок. Це дозволяє автоматизувати контроль і швидко реагувати на зміну екологічної ситуації.

Висновки до розділу 4

У розділі виконано моделювання процесу розповсюдження забруднюючих речовин у просторі та часі. Показано, як змінюється концентрація при віддаленні від джерела та при зміні умов у часі. Це дозволило визначити характер розподілу забруднення і знайти ділянки з максимальними значеннями.

Окремо реалізовано підхід до визначення перевищення гранично допустимих концентрацій. Показано, як автоматично знаходити моменти та області, де рівень забруднення стає небезпечним.

Отримані результати підтверджують, що використання математичного моделювання дозволяє не лише оцінювати поточний стан повітря, а й прогнозувати його зміну. Це створює основу для подальшої реалізації системи контролю та візуалізації результатів у середовищі MATLAB.

5 РЕАЛІЗАЦІЯ СИСТЕМИ АНАЛІЗУ ТА ВІЗУАЛІЗАЦІЇ РЕЗУЛЬТАТІВ У СЕРЕДОВИЩІ MATLAB

У цьому розділі розглядається поєднання математичної моделі з розробленою системою моніторингу. Основна увага приділяється тому, як результати розрахунків використовуються разом із даними від датчиків для оцінки стану повітря в реальних умовах.

Окремо аналізується робота датчиків у часі, процес формування і передачі даних, а також використання координатної прив'язки для визначення розподілу концентрацій у просторі. Це дозволяє перейти від окремих розрахунків до моделювання роботи всієї системи.

У результаті формується підхід, який об'єднує вимірювання, моделювання та аналіз, що дає можливість більш точно оцінювати стан повітря і своєчасно виявляти перевищення допустимих значень.

5.1 Аналіз концентрацій забруднюючих речовин CO, NO₂ та SO₂

У цьому підпункті розглядається моделювання роботи датчиків у складі автоматизованої системи моніторингу. Основна задача полягає в тому, щоб описати процес збору даних у часі з урахуванням циклічного режиму роботи та обмежень системи передачі.

У реальній системі датчики не вимірюють безперервно, а працюють із заданим інтервалом. У даній роботі приймається, що вимірювання виконуються кожні 60 секунд. Це дозволяє отримувати достатню деталізацію даних і при цьому не перевантажувати систему.

Часовий інтервал вимірювань задається як (5.1):

$$t_i = i\tau, \quad (5.1)$$

де $\tau = 60\text{с}$ – інтервал між вимірюваннями.

Кількість вимірювань за певний час визначається як (5.2):

$$N = \frac{T}{\tau}, \quad (5.2)$$

де T – загальний час роботи системи.

Кожен датчик формує пакет даних, який включає значення концентрації, координати та час (5.3):

$$D_i = (C_i, x_i, y_i, t_i). \quad (5.3)$$

Ці дані передаються на сервер або диспетчерський пункт для подальшої обробки.

Важливою умовою є те, що швидкість формування даних не повинна перевищувати можливості каналу передачі (5.4):

$$V_{\text{сист}} < V_{\text{каналу}}, \quad (5.4)$$

де $V_{\text{сист}}$ – швидкість генерації даних;

$V_{\text{каналу}}$ – пропускна здатність каналу.

Це забезпечує стабільну роботу системи без втрати інформації.

Нижче наведено MATLAB-код для моделювання роботи датчика у часі (рис. 5.1). Результат моделювання на рисунку 5.2.

```

>> format compact
close all

% Моделювання роботи датчика
% Інтервал вимірювання 60 секунд

tau = 60;           % інтервал, с
T = 3600;           % час моделювання (1 година)
t = 0:tau:T;

N = length(t);

% Імітація концентрації (наприклад, синусоїдальна зміна)
C = 0.5 + 0.3 .* sin(2*pi .* t / 3600);

% Імітація координат (рух датчика)
x = 100 + 2 .* t;    % рух по осі x
y = 50 + 1 .* t;    % рух по осі y

% Формування пакету даних
data = [t' C' x' y'];

% Розрахунок швидкості передачі
packet_size = 32;    % байт (умовно)
V_system = (packet_size * N) / T; % байт/с

V_channel = 1000;    % пропускна здатність каналу, байт/с

fprintf('Кількість вимірювань: %d\n', N);
fprintf('Швидкість генерації даних: %.2f байт/с\n', V_system);

if V_system < V_channel
    fprintf('Система працює стабільно\n');
else
    fprintf('Перевантаження каналу!\n');
end

% Графік
figure
plot(t/60, C, 'b', 'LineWidth', 2)
grid on
xlabel('Час, с')
ylabel('Концентрація, мг/м^3')
title('Моделювання роботи датчика у часі')
Кількість вимірювань: 61
Швидкість генерації даних: 0.54 байт/с
Система працює стабільно

```

Рис. 5.1. MATLAB-код для моделювання роботи датчика у часі

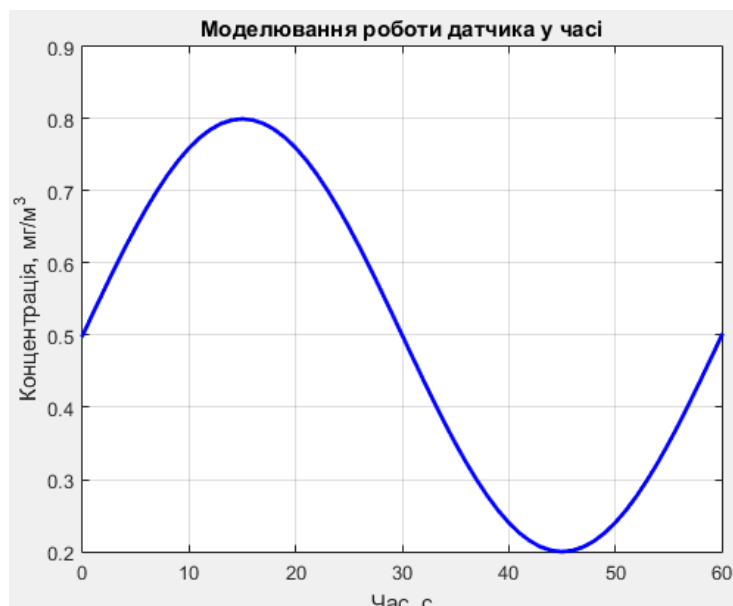


Рис. 5.2. Моделювання роботи датчика у часі

5.2 Алгоритм визначення перевищення ГДК

У цьому підпункті розглядається поєднання математичного моделювання з координатною прив'язкою датчиків. Основна ідея полягає в тому, що кожне вимірювання має не тільки значення концентрації, а й координати, що дозволяє аналізувати розподіл забруднення у просторі.

Координати датчиків задаються у вигляді набору точок:

Для оцінки розподілу забруднення необхідно визначити відстань від джерела до кожного датчика (5.5):

$$r_i = \sqrt{x_i^2 + y_i^2}. \quad (5.5)$$

Ця відстань використовується як вхідний параметр для розрахунку концентрації. Таким чином, для кожного датчика формується значення (5.6):

$$C_i = C(r_i). \quad (5.6)$$

Це дозволяє перейти від теоретичної залежності концентрації від відстані до реального просторового розподілу.

Нижче наведено MATLAB-код для моделювання розподілу концентрацій у площині (рис. 5.3). Результат моделювання на рисунку 5.4.

```
>> format compact
close all

% Параметри
Q = 120;      % г/с
u = 5;        % м/с
H = 60;       % м

% Координати датчиків (приклад)
x = [100 200 300 400 500 600];
y = [50 100 150 100 50 0];

% Відстань до джерела
r = sqrt(x.^2 + y.^2);

% Параметри розсіювання
sigma_y = 0.22 .* r .* (1 + 0.0001 .* r).^(-0.5);
sigma_z = 0.20 .* r;

% Концентрація
C = (Q .* 1000) ./ (pi .* u .* sigma_y .* sigma_z) .* exp(-(H.^2) ...
./ (2 .* sigma_z.^2));

% Вивід
disp('Концентрації в точках:')
disp(C)

% Візуалізація
figure
scatter(x, y, 80, C, 'filled')
colorbar
grid on
xlabel('X, м')
ylabel('Y, м')
title('Просторовий розподіл концентрації')

% Підписи
for i = 1:length(x)
    text(x(i), y(i), [' ' num2str(C(i), '%.2f')])
end
Концентрації в точках:
    0.3816    1.4275    1.0517    0.7998    0.5897    0.4382
```

Рис. 5.3. MATLAB-код для моделювання роботи датчика у часі

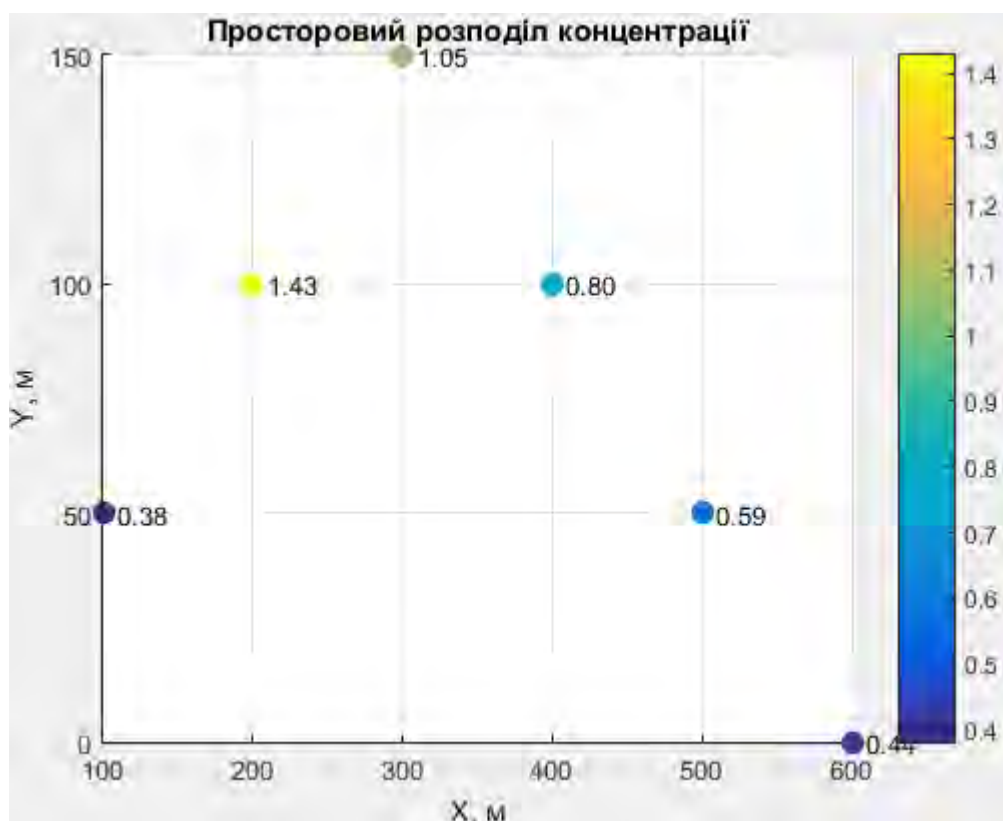


Рис. 5.4. Просторовий розподіл концентрації забруднюючих речовин

5.3 Візуалізація результатів моделювання

Після виконання розрахунків важливо не тільки отримати числові значення, а й подати їх у зручному для аналізу вигляді. Візуалізація дозволяє швидко оцінити стан повітря, побачити зони підвищеного забруднення та визначити небезпечні ділянки.

У даній роботі використовуються декілька підходів до візуалізації. Перший – це побудова графіків залежності концентрації від відстані або часу. Другий – відображення просторового розподілу у вигляді карти. Це дозволяє оцінити ситуацію не тільки в окремих точках, а й у всій області.

Для побудови карти використовується інтерполяція значень концентрації між датчиками. Це дозволяє отримати більш плавний розподіл (5.7):

$$C(x, y) \rightarrow C_{interp}(x, y). \quad (5.7)$$

Це дозволяє виділяти небезпечні точки на графіку. Нижче наведено карту концентрацій з позначенням перевищення (рис. 5.5).

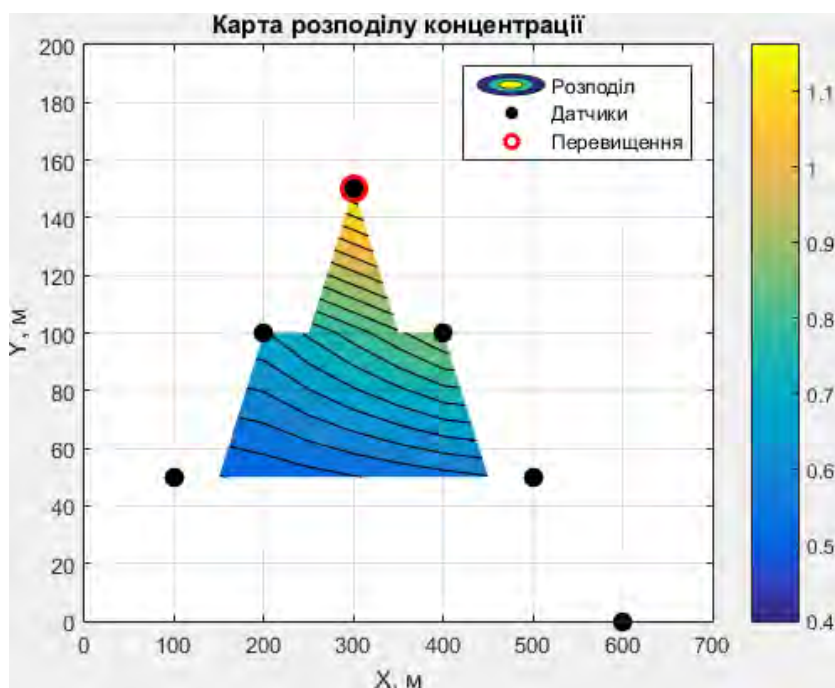


Рис. 5.5. Карта розподілу концентрації

5.4 Аналіз зон екологічного ризику

Після виконання моделювання та візуалізації наступним кроком є аналіз отриманих результатів. Основна задача полягає у визначенні зон, де рівень забруднення становить найбільшу небезпеку.

Для цього використовується розподіл концентрацій у просторі. На основі отриманих значень територія може бути поділена на зони залежно від рівня забруднення. У найпростішому випадку виділяються три рівні: безпечний, підвищений та небезпечний. Класифікація може бути задана у вигляді умов (5.8):

$$Z = \begin{cases} 0, & C < 0,5C_{ГДК} \\ 1, & 0,5C_{ГДК} \leq C \leq C_{ГДК} \\ 2, & C > C_{ГДК} \end{cases} \quad (5.8)$$

Такий підхід дозволяє не тільки визначити факт перевищення, а й оцінити ступінь небезпеки.

Для аналізу також важливо визначити площу зон підвищеного забруднення. Це можна зробити шляхом підрахунку кількості точок, у яких виконується відповідна умова (5.9):

$$S_{risk} = n_{risk} \Delta S. \quad (5.9)$$

Це дозволяє оцінити масштаб проблеми. Нижче наведено MATLAB-код для визначення зон ризику (рис. 5.6). Результат моделювання на рисунку 5.7.

```
>> format compact
close all

% Дані
Cq = Cq;          % карта концентрацій (з попереднього пункту)
C_GDK = 1.0;

% Класифікація
Z = zeros(size(Cq));

Z(Cq < 0.5*C_GDK) = 0;
Z(Cq >= 0.5*C_GDK & Cq <= C_GDK) = 1;
Z(Cq > C_GDK) = 2;

% Побудова карти зон
figure
imagesc(Z)
colorbar
grid on
title('Зони екологічного ризику')

% Підрахунок площі
dx = 50;          % крок по x
dy = 50;          % крок по y

area_cell = dx * dy;

n_risk = sum(Z(:) == 2);
S_risk = n_risk * area_cell;

fprintf('Площа небезпечної зони: %.2f м^2\n', S_risk);
Площа небезпечної зони: 2500.00 м^2
```

Рис. 5.6. MATLAB-код для визначення зон ризику

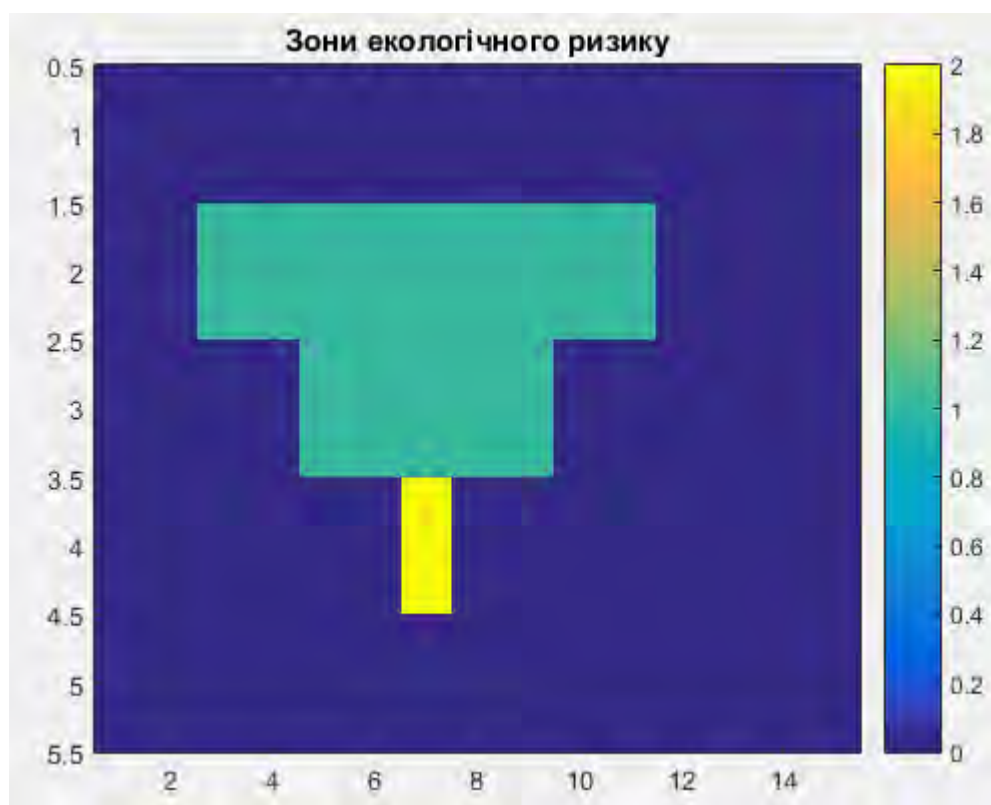


Рис. 5.7. Зони екологічного ризику

У результаті визначаються ділянки, де концентрація перевищує допустимі значення, а також оцінюється їх площа. Це дозволяє більш точно оцінити екологічну ситуацію та визначити пріоритетні зони для контролю.

Таким чином, аналіз зон екологічного ризику є завершальним етапом обробки даних і дозволяє перейти від розрахунків до практичних висновків.

Висновки до розділу 5

У розділі виконано моделювання роботи автоматизованої системи моніторингу якості повітря з урахуванням реальних умов функціонування. Показано, як дані від датчиків формуються у часі, передаються та використовуються разом із математичною моделлю для оцінки стану повітря.

Реалізовано підхід до просторового аналізу з урахуванням координат датчиків, що дозволяє визначати розподіл концентрацій у межах контрольованої території. Це дало можливість перейти від окремих вимірювань до побудови карти забруднення.

Окрему увагу приділено візуалізації результатів та визначенню перевищення гранично допустимих концентрацій. Показано, як автоматично виділяти небезпечні ділянки та оцінювати рівень ризику.

У результаті отримано підхід, який поєднує вимірювання, моделювання та аналіз, що дозволяє більш точно оцінювати стан повітря та визначати зони підвищеного екологічного навантаження.

ВИСНОВКИ

У ході виконання роботи розглянуто задачу контролю якості повітря в зоні впливу енергетичного об'єкта і показано, що вона значно складніша, ніж просто вимірювання концентрацій. Насправді рівень забруднення змінюється як у просторі, так і з часом, і на нього впливає багато різних факторів. Через це для нормального аналізу доводиться поєднувати реальні вимірювання з математичним моделюванням.

На початку було розглянуто сучасні системи моніторингу. Порівнювались розподілені та гібридні підходи. У результаті стало зрозуміло, що одні лише датчики дають інформацію тільки в окремих точках, а от поєднання вимірювань з розрахунками дозволяє отримати більш повну картину. Саме цей варіант і був обраний для подальшої роботи.

Після цього сформовано вимоги до системи. Вона має працювати постійно, враховувати зміну параметрів у часі і просторі, автоматично визначати перевищення допустимих значень і підтримувати як стаціонарні, так і рухомі датчики. Також враховано обмеження каналів передачі даних, що вплинуло на вибір інтервалу вимірювань і загальну структуру системи.

У другому розділі обґрунтовано вибір математичної моделі. Показано, що гаусівський підхід добре підходить для таких задач, бо дає нормальну точність і при цьому не надто складний у реалізації. Розглянуто фізичну сторону процесу, визначено параметри і умови, за яких модель працює коректно. Також підтверджено, що її зручно використовувати в MATLAB.

Далі була розроблена структура самої системи. Визначено її основні частини: датчики, модулі передачі і блок обробки. Окремо розглянуто характеристики сенсорів і їх вплив на точність. Також проаналізовано процес збору і передачі даних, де показано, що циклічний режим із інтервалом близько 60 секунд дозволяє нормально балансувати між точністю і навантаженням.

Окремо звернено увагу на використання GPS. Це дозволяє застосовувати рухомі датчики і прив'язувати кожне вимірювання до координат. У результаті можна вже не просто дивитися на окремі точки, а будувати повноцінну карту розподілу забруднення.

У наступному етапі виконано моделювання процесу поширення забруднення. Отримано залежності концентрації від відстані і часу. Цікавий момент у тому, що максимальні значення можуть виникати не прямо біля джерела, а на певній відстані від нього, що важливо враховувати при розміщенні датчиків.

Також реалізовано алгоритм визначення перевищення допустимих концентрацій. Система може автоматично знаходити небезпечні значення і фіксувати моменти їх появи. Це вже дозволяє перейти від простого спостереження до контролю.

На фінальному етапі об'єднано модель і систему моніторингу. Показано, як розрахункові дані можна використовувати разом із вимірюваннями. Реалізовано моделювання роботи датчиків у часі, передачу інформації і просторовий аналіз. Окремо зроблено візуалізацію, що дозволяє наочно оцінити ситуацію і виділяти зони підвищеного ризику.

У підсумку розроблено підхід до створення системи моніторингу, яка поєднує вимірювання, розрахунки і аналіз. Така система дає більш точну оцінку стану повітря, ніж використання тільки одного з цих методів. Практично її можна застосовувати для контролю в районах розміщення енергетичних об'єктів, щоб швидко виявляти небезпечні ситуації.

Надалі цю роботу можна розширити, якщо врахувати складніші фактори, наприклад зміну погодних умов, рельєф або взаємодію домішок між собою. Також можна покращити систему за рахунок точніших датчиків і сучасніших засобів передачі даних.

У результаті поставлена мета досягнута, а отримане рішення можна використовувати як основу для подальших досліджень або практичного впровадження.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Hanna S. R. Handbook on atmospheric diffusion / S. R. Hanna, G. A. Briggs, R. P. Hosker. – Oak Ridge : U.S. Department of Energy, 1982. – 102 p. – Режим доступу: <https://www.osti.gov/servlets/purl/5591108>. – Дата звернення: 10.04.2026.
2. Beychok M. R. Fundamentals of stack gas dispersion / M. R. Beychok. – 4th ed. – Irvine : Author, 2005. – Режим доступу: <http://www.air-dispersion.com/formulas.html>. – Дата звернення: 10.04.2026.
3. Seinfeld J. H. Atmospheric chemistry and physics : from air pollution to climate change / J. H. Seinfeld, S. N. Pandis. – 3rd ed. – New York : Wiley, 2016. – 1152 p. – Режим доступу: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9781119221166>. – Дата звернення: 10.04.2026.
4. Air quality guidelines : global update 2021 / World Health Organization. – Geneva : WHO, 2021. – Режим доступу: <https://www.who.int/publications/i/item/9789240034228>. – Дата звернення: 10.04.2026.
5. Гранично допустимі концентрації (ГДК) забруднюючих речовин в атмосферному повітрі населених місць : наказ Міністерства охорони здоров'я України від 14.02.1997 № 97. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0097-97>. – Дата звернення: 10.04.2026.
6. MATLAB documentation [Електронний ресурс] / MathWorks. – Режим доступу: <https://www.mathworks.com/help/matlab/>. – Дата звернення: 10.04.2026.
7. Snyder E. G. The changing paradigm of air pollution monitoring / E. G. Snyder, T. H. Watkins, P. A. Solomon [etc.] // Environmental Science & Technology. – 2013. – Vol. 47, № 20. – P. 11369–11377. – DOI: 10.1021/es4022602. – Режим доступу: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/es4022602>. – Дата звернення: 10.04.2026.
8. OpenAQ. Air quality data platform (CO, NO₂, SO₂ datasets) [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://openaq.org/>. – Дата звернення: 10.04.2026.

9. Спеціальні розділи математики: конспект лекцій : навч. посіб. / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: Ю. В. Куц, Ю. Ю. Лисенко, В. М. Сокурєнко. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024. – 192 с.

10. Муравйов О. В. Передача даних та сучасні методи обробки сигналів. Практикум: навчальний посібник / О. В. Муравйов; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 55 с.

11. Статистичні методи визначення залежностей між випадковими величинами: навчальний посібник / Ю. В. Куц, Ю. Ю. Лисенко; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. – 115 с.

12. Комп'ютерне проектування електронних схем. Комп'ютерний практикум [Електронний ресурс] : навчальний посібник для здобувачів ступеня бакалавра за освітньою програмою «Комп'ютерно-інтегровані системи та технології в приладобудуванні» спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» та 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка» / Р. М. Галаган ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 21,33 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. – 419 с.

13. Баженов В.Г. Електроніка. Лабораторний практикум: навчальний посібник / В. Г. Баженов, Є. Ф. Суслов, Ю. Ю. Лисенко, А.С. Момот; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 70 с.

14. Куц Ю.В. Новітні системи та технології: навчальний посібник / Ю. В. Куц, Ю. Ю. Лисенко, А.С. Момот; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 123 с.