

Вінницький національний технічний університет  
(повне найменування вищого навчального закладу)

Факультет інформаційних електронних систем  
(повне найменування інституту, назва факультету (відділення))

Кафедра інформаційних радіоелектронних технологій і систем  
(повна назва кафедри (предметної, циклової комісії))

## МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему:

«Інформаційно-вимірювальна система контролю параметрів мікроклімату  
в підземних транспортних спорудах»

Виконав: студент 2-го курсу, групи КІВТ-24м  
спеціальності 175 – Інформаційно вимірювальні  
технології

(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)

 Луценко В.І.  
(прізвище та ініціали)

Керівник: к.т.н., доцент каф. ІРТС

 Дудатьєв І.А.  
(прізвище та ініціали)

«15» 12 2025 р.

Опонент: к.т.н., доцент каф. ІКСТ,

 Стальченко О.В.  
(прізвище та ініціали)

«16» 12 2025 р.

Допущено до захисту

Завідувач кафедри ІРТС

 д.т.н., проф. Осадчук О.В.

(прізвище та ініціали)

«17» 12 2025 р.

Вінниця ВНТУ - 2025 рік

Факультет інформаційних електронних систем  
Кафедра інформаційних радіоелектронних технологій і систем  
Рівень вищої освіти II-й (магістерський)  
Галузь знань – 17 Електроніка, автоматизація та електронні комунікації  
Спеціальність – 175 Інформаційно-вимірювальні технології  
Освітньо-професійна програма – Комп'ютеризовані інформаційно-вимірювальні технології

**ЗАТВЕРДЖУЮ**  
Завідувач кафедри ІРТС  
д.т.н., проф. Осадчук О.В.  
«16» вересня 2025 року

### **ЗАВДАННЯ НА МАГІСТЕРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ**

Луценко Віталію Ігоровичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Інформаційно-вимірювальна система контролю параметрів мікроклімату в підземних транспортних спорудах  
керівник роботи к.т.н., доцент кафедри ІРТС Дудатьєв І.А.

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затвержені наказом вищого навчального закладу від 24.09.2025 р. №313.

2. Строк подання студентом роботи 15.12.2025р.

3. Вихідні дані до роботи: Максимальна відносна похибка ІВС - 1%. Об'єкти контролю – температура, відносна вологість, концентрація шкідливих і токсичних газів, запиленість та швидкість повітряних потоків. Мова програмування – С.

4. Зміст текстової частини. Вступ. Загальні відомості про акумулятори портативних комп'ютерів. Теоретичні основи інформаційно-вимірювальних систем контролю параметрів мікроклімату в підземних транспортних спорудах. Апаратна та алгоритмічна розробка інформаційно – вимірювальної системи контролю параметрів мікроклімату в підземних транспортних спорудах. Метрологічне забезпечення та адаптація до реальних умов експлуатації ІВС контролю параметрів мікроклімату в підземних транспортних спорудах. Економічна частина. Висновки. Список використаних джерел. Додатки.

5. Перелік ілюстративного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень). Приклад інформаційної моделі станції метро. Оснащення станцій метрополітену, вентшахт/венткіосків та вестибюлів приладами контролю мікроклімату. Схематичне зображення станції метро в розрізі. Єдиний центр контролю та управління мікрокліматом метрополітену. Система вентиляції метрополітенів фірми Zitron. Вентиляційне встановлення на перегоні глибоко закладеної лінії. Вентиляційний кіоск № 5 СБЛ. Вентиляційний кіоск В/К №248 СПЛ.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	виконання прийняв
Основна частина	Дудатьєв І.А. доцент каф. ІРТС, к.т.н.		
Економічна частина	Кавецький В.В. доцент каф. ЕПВМ, доцент, к.е.н.		

7. Дата видачі завдання 16.09.2025 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

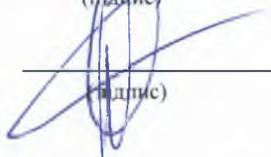
№ з/п	Назва етапів магістерської кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	При-мітка
1.	Вибір, узгодження та затвердження тем МКР на випусковій кафедрі.	02.09.2025-07.09.2025	
2.	Огляд та аналіз літературних джерел.	08.09.2025-16.09.2025	
3.	Затвердження тем по ВНТУ. Розробка індивідуального завдання на МКР.	17.09.2025-24.09.2025	
4.	Попередня розробка основних розділів. Аналіз вирішення поставленої задачі. Розробка структурної схеми та технічних рішень.	01.10.2025-20.10.2025	
5.	Математичне моделювання та електричні розрахунки. Експериментальне дослідження.	21.10.2025-04.11.2025	
6.	Розробка ілюстративної частини МКР.	05.11.2025-12.11.2025	
7.	Економічна частина.	13.11.2025-23.11.2025	
8.	Оформлення пояснювальної записки та ілюстративної частини.	24.11.2025-28.11.2025	
9.	Нормоконтроль.	29.11.2025-03.12.2025	
10.	Попередній захист МКР, доопрацювання, рецензування МКР.	04.12.2025-17.12.2025	
11.	Захист МКР ЕК.	18.12.2025-19.12.2025	

Студент

  
(підпис)

Луценко В.І.

Керівник роботи

  
(підпис)

Дудатьєв І.А.

## АНОТАЦІЯ

УДК 681.5:656.1.5

Луценко В.І. Інформаційно-вимірювальна система контролю параметрів мікроклімату в підземних транспортних спорудах. Магістерська кваліфікаційна робота зі спеціальності 175 – Інформаційно-вимірювальні технології, освітня програма - Комп'ютеризовані інформаційно-вимірювальні технології. Вінниця: ВНТУ, 2025. 121 с. На укр. мові. Бібліогр.: 48 назв; рис.: 33; табл. 16.

У магістерській кваліфікаційній роботі розглянуто проблему забезпечення безпечних і комфортних умов експлуатації підземних транспортних споруд шляхом підвищення ефективності контролю параметрів мікроклімату. Запропоновано комплексний підхід до побудови інформаційно-вимірювальної системи контролю мікроклімату, який базується на одночасному вимірюванні фізичних і хімічних параметрів повітря, автоматизованій обробці даних та формуванні попереджувальних і аварійних сигналів у разі перевищення нормативних значень. Такий підхід дозволяє підвищити рівень безпеки пасажирів і персоналу, забезпечити надійну роботу інженерного обладнання та оптимізувати режими функціонування вентиляційних систем.

Проведено аналіз метрологічних характеристик інформаційно-вимірювальної системи та виконано оцінку сумарної похибки вимірювань з урахуванням похибок сенсорних каналів і впливу реальних умов експлуатації. Отримані результати підтверджують доцільність використання запропонованої ІВС у підземних транспортних спорудах для підвищення достовірності контролю параметрів мікроклімату та відповідності вимогам сучасних нормативних стандартів.

Ключові слова: мікроклімат; підземні транспортні споруди; інформаційно-вимірювальна система; моніторинг повітря; вентиляція; токсичні гази; запиленість; метрологічна похибка; безпека експлуатації.

## ABSTRACT

V. Lutsenko. Information and Measurement System for Monitoring Microclimate Parameters in Underground Transport Facilities. Master's qualification thesis on specialty 175 Information and measurement technologies, educational programme - Computerised information and measurement technologies. Vinnytsia: VNTU, 2025. 121 p.

In Ukrainian speech Bibliography: 48 titles; Fig.: 33; table 16.

The master's qualification thesis addresses the problem of ensuring safe and comfortable operating conditions in underground transport facilities by improving the efficiency of microclimate parameter monitoring. Underground structures such as metro systems, transport tunnels, and underground parking facilities are characterized by limited natural air exchange, high passenger density, and the presence of thermal and gaseous pollution sources, which necessitates continuous and reliable air quality monitoring.

A metrological analysis of the information and measurement system was performed, and the overall measurement error was evaluated considering sensor inaccuracies, data processing algorithms, and real operating conditions. The obtained results confirm the feasibility and effectiveness of the proposed system for application in underground transport facilities and its compliance with modern safety and environmental standards.

Keywords: microclimate; underground transport facilities; information and measurement system; air quality monitoring; ventilation; toxic gases; particulate matter; measurement error; operational safety.

## ЗМІСТ

<b>ВСТУП</b> .....	8
<b>1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНИХ СИСТЕМ КОНТРОЛЮ ПАРАМЕТРІВ МІКРОКЛІМАТУ В ПІДЗЕМНИХ ТРАНСПОРТНИХ СПОРУДА</b> .....	11
1.1 Особливості об'єкту дослідження.....	11
1.2 Технічний аналіз та актуальність контролю параметрів мікроклімату в підземних транспортних спорудах.....	12
1.3 Температура повітря.....	14
1.4 Вологість повітря.....	16
1.5 Концентрація вуглекислого газу (CO <sub>2</sub> ).....	18
1.6 Концентрація чадного газу (CO) .....	20
1.7 Запиленість та концентрація зважених часток (PM) .....	22
1.8 Концентрація вибухонебезпечних та токсичних газів (NO <sub>x</sub> , SO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> тощо).....	24
1.9 Швидкість та напрям повітряного потоку.....	26
1.10 Функціональні вимоги до ІВС контролю мікроклімату.....	28
1.11 Висновки до розділу.....	37
<b>2 АПАРАТНА ТА АЛГОРИТМІЧНА РОЗРОБКА ІНФОРМАЦІЙНО – ВИМІРЮВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ ПАРАМЕТРІВ МІКРОКЛІМАТУ В ПІДЗЕМНИХ ТРАНСПОРТНИХ СПОРУДАХ</b> .....	39
2.1 Розробка функціональної схеми ІВС контролю параметрів мікроклімату в підземних транспортних спорудах.....	39
2.2 Вибір елементної бази ІВС контролю параметрів мікроклімату в підземних транспортних спорудах.....	42
2.3 Алгоритм роботи ІВС контролю параметрів мікроклімату в підземних транспортних спорудах.....	60
2.4 Висновки до розділу.....	64

<b>3 МЕТРОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТА АДАПТАЦІЯ ДО РЕАЛЬНИХ УМОВ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ІВС КОНТРОЛЮ ПАРАМЕТРІВ МІКРОКЛІМАТУ В ПІДЗЕМНИХ ТРАНСПОРТНИХ СПОРУДАХ.....</b>	<b>66</b>
3.1 Розрахунок необхідного мікроклімату в підземних транспортних спорудах (на прикладі станції «Театральна» Вінницького метрополітену) .....	66
3.2 Метрологічне забезпечення ІВС контролю параметрів мікроклімату в підземних транспортних спорудах.....	70
3.3 Висновки до розділу.....	78
<b>4 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА .....</b>	<b>80</b>
4.1 Проведення комерційного та технологічного аудиту науково-технічної розробки .....	80
4.2 Розрахунок узагальненого коефіцієнта якості розробки .....	84
4.3 Розрахунок витрат на проведення науково-дослідної роботи.....	86
4.4 Розрахунок економічної ефективності науково-технічної розробки при її можливій комерціалізації потенційним інвестором .....	101
4.5 Висновки до розділу.....	105
<b>ВИСНОВКИ .....</b>	<b>107</b>
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....</b>	<b>109</b>
Додаток А (обов'язковий) Ілюстративний матеріал.....	109
Додаток Б (обов'язковий) Протокол перевірки навчальної (магістерської) кваліфікаційної роботи .....	118
Додаток В (довідниковий) Фрагмент лістингу програмного забезпечення.....	120

## ВСТУП

### *Актуальність*

Сучасні підземні транспортні споруди — метрополітени, транспортні тунелі, підземні паркінги та пішохідні переходи — є складними інженерними об'єктами з підвищеними вимогами до безпеки та надійності експлуатації. Особливістю таких об'єктів є обмежений природний повітрообмін, значні пасажирські потоки, наявність джерел тепла та шкідливих домішок, а також вплив геологічних і техногенних факторів. У сукупності це формує специфічний мікроклімат, який істотно відрізняється від наземних умов і потребує постійного контролю.

Відхилення параметрів мікроклімату від нормативних значень можуть призводити до погіршення самопочуття пасажирів і персоналу, зниження працездатності інженерних систем, прискореного зносу обладнання та конструкцій, а також до виникнення аварійних і пожежонебезпечних ситуацій. Особливо небезпечними є підвищені концентрації токсичних і вибухонебезпечних газів, дрібнодисперсного пилу та надмірна вологість, які в умовах підземного простору здатні швидко накопичуватися.

Сучасні вимоги до експлуатації підземних транспортних споруд передбачають впровадження інформаційно-вимірювальних систем (ІВС), що забезпечують безперервний моніторинг параметрів мікроклімату, автоматизований аналіз даних і своєчасне реагування на небезпечні відхилення. Такі системи є ключовим елементом інтегрованої інженерної інфраструктури, оскільки дозволяють підвищити рівень безпеки, оптимізувати роботу вентиляційних установок і знизити енергоспоживання.

Отже, розробка та вдосконалення інформаційно-вимірювальної системи контролю параметрів мікроклімату в підземних транспортних спорудах є актуальною науково-технічною задачею, що має важливе практичне значення для розвитку міської транспортної інфраструктури та забезпечення безпеки людей.

### ***Мета роботи***

Метою магістерської роботи є розробка інформаційно-вимірювальної системи контролю параметрів мікроклімату в підземних транспортних спорудах, здатної забезпечувати безперервний моніторинг, аналіз та автоматизоване реагування на відхилення параметрів повітряного середовища від нормативних значень.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати ряд ***задач***:

- проаналізувати особливості мікроклімату підземних транспортних споруд та чинники, що впливають на його формування;
- дослідити нормативні вимоги та гранично допустимі концентрації параметрів мікроклімату;
- визначити перелік ключових параметрів, що підлягають постійному контролю;
- розробити функціональну та структурну схему інформаційно-вимірювальної системи;
- обґрунтувати вибір сенсорів та апаратних засобів для вимірювання параметрів мікроклімату;
- розробити алгоритми збору, обробки та аналізу вимірювальної інформації;
- забезпечити можливість інтеграції ІВС з вентиляційними та аварійними системами;
- оцінити ефективність та надійність роботи розробленої системи в умовах реальної експлуатації.

***Об'єктом дослідження*** є процес формування та контролю параметрів мікроклімату в підземних транспортних спорудах.

***Предметом дослідження*** є методи, алгоритми та технічні засоби побудови інформаційно-вимірювальних систем для моніторингу мікроклімату в умовах підземної інфраструктури.

### ***Методи дослідження***

У процесі виконання роботи використовуються методи теорії вимірювань, аналізу похибок, цифрової обробки сигналів, методи схемотехнічного та алгоритмічного проєктування, моделювання мікрокліматичних процесів, а також експериментальні методи дослідження роботи сенсорів та інформаційно-вимірювальних систем.

### ***Наукова новизна одержаних результатів***

У роботі отримало подальшого розвитку теоретичне обґрунтування побудови інформаційно-вимірювальних систем контролю мікроклімату в підземних транспортних спорудах на основі комплексного врахування взаємного впливу фізичних і хімічних параметрів повітряного середовища, а також методичний підхід до оцінювання метрологічних характеристик ІВС, що дозволяє виконувати узагальнену оцінку сумарної похибки системи в цілому з урахуванням похибок окремих сенсорних каналів, алгоритмів обробки даних та впливу умов експлуатації.

***Практична цінність магістерської роботи*** полягає в тому, що:

- розроблені рішення можуть бути використані при проєктуванні та модернізації систем мікрокліматичного контролю в метрополітенах і підземних транспортних об'єктах;
- запропонована ІВС сприяє підвищенню безпеки пасажирів і персоналу;
- алгоритми контролю можуть бути інтегровані в автоматизовані системи вентиляції та диспетчеризації.

***Особистий внесок здобувача.*** Основні положення і результати магістерської кваліфікаційної роботи отримані автором практично самостійно.

***Структура і обсяг роботи.*** Магістерська кваліфікаційна робота складеться з 4 розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків.

# 1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНИХ СИСТЕМ КОНТРОЛЮ ПАРАМЕТРІВ МІКРОКЛІМАТУ В ПІДЗЕМНИХ ТРАНСПОРТНИХ СПОРУДАХ

## 1.1 Особливості об'єкту дослідження

У 2011 році на черговій сесії Вінницької міської ради було офіційно заявлено про перспективну необхідність розгортання в місті метрополітену як елемента високопродуктивної транспортної інфраструктури. У виступах підкреслювалося, що прогнозоване збільшення пасажиропотоку, урбанізаційне зростання та перевантаження існуючих транспортних вузлів створюють передумови для впровадження підземної системи швидкісного перевезення.

З метою попереднього аналізу можливостей реалізації проєкту та формування концептуального бачення майбутньої транспортної мережі міською радою було оголошено відкритий конкурс на розробку оптимізованої схеми Вінницького метрополітену (переможця конкурсу представлено на рис 1.1). У технічних вимогах конкурсу зазначалося, що схема має враховувати:

- топографічні особливості території;
- очікувані пасажирські навантаження;
- інтеграцію з наземними маршрутами;
- можливості будівництва станцій та пересадкових вузлів;
- перспективи розширення мережі.

Зазначена ініціатива розглядалася як аналітичний та концептуальний етап, спрямований на створення техніко-економічних передумов для потенційного запуску проєкту метрополітену у Вінниці.

З часу оголошення цієї ініціативи Вінниця продовжує активно розбудовуватися: місто розширюється, зростає кількість населення та щорічно збільшується транспортне навантаження. У таких умовах ідея створення метрополітену стає не лише перспективною, а й усе більш реалістичною та актуальною.



Рисунок 1.1 – Схема Вінницького метрополітену

Розвиток міської інфраструктури, нові житлові масиви та збільшення пасажиропотоку роблять потребу у високоінтенсивному підземному транспорті ще ближчою та обґрунтованішою.

## 1.2 Технічний аналіз та актуальність контролю параметрів мікроклімату в підземних транспортних спорудах

Підземні транспортні споруди, такі як метрополітени, тунелі, підземні паркінги та перехідні галереї, характеризуються специфічними умовами експлуатації, що істотно відрізняються від наземних об'єктів. Обмежений повітрообмін, підвищена вологість, значна концентрація пилу та газів, а також наявність технічного обладнання створюють комплекс факторів, які впливають на безпеку та комфорт людей, працездатність інженерних систем і довговічність конструкцій [1-3]. У зв'язку з цим задача контролю мікрокліматичних параметрів у підземних спорудах є надзвичайно актуальною.

Сучасні вимоги до експлуатації транспортних об'єктів передбачають постійний моніторинг стану повітряного середовища (рис. 1.2), автоматичний збір та аналіз даних, а також оперативне реагування на відхилення від нормативних показників. Такі функції можуть бути реалізовані за допомогою інформаційно-вимірювальних систем (ІВС), які поєднують апаратні та програмні компоненти для комплексного контролю мікроклімату. Їх застосування забезпечує підвищення рівня безпеки пасажирів, ефективну роботу вентиляційних установок, оптимізацію енергоспоживання та зменшення експлуатаційних ризиків.



Рисунок 1.2 – Ключові параметри мікроклімату

Підземні споруди є обмеженим простором, у якому природні процеси повітрообміну значно ускладнені. Будь-які відхилення параметрів мікроклімату від нормативних значень можуть призвести до небажаних наслідків: погіршення самопочуття людей, утворення корозії металевих елементів, пошкодження електротехнічних систем, зростання ризику пожежо- та вибухонебезпечних ситуацій. Тому оперативний і надійний контроль є ключовою умовою для безпечної експлуатації підземних об'єктів.

Крім цього, сучасні підземні транспортні комплекси мають високий пасажиропотік, що формує значне антропогенне навантаження на систему вентиляції та кліматичного регулювання. Якщо система не здатна автоматично

адаптуватися до змін зовнішніх факторів, це призводить до перевитрати енергії, швидкого зносу обладнання та зниження комфорту перебування.

### 1.3 Температура повітря

Впливає на комфорт пасажирів, роботу електронних систем, тепловий режим обладнання. Підвищена температура може спричинити перегрів технічних вузлів, тоді як занижена — конденсацію та корозію.

Температура повітря є одним із визначальних параметрів мікроклімату, що має суттєвий вплив на умови експлуатації підземних транспортних споруд, таких як метрополітени, тунелі та підземні паркінги [4-6]. Вона формує тепловий баланс середовища, визначає рівень комфорту пасажирів та персоналу, а також впливає на працездатність і довговічність інженерних систем та конструкцій.

У підземному просторі температура повітря характеризується відносною стабільністю порівняно з наземними умовами, проте перебуває під впливом низки факторів. Одним із базових джерел температурної стабільності є геотермальне тепло. На значній глибині, де розташовані транспортні тунелі та станції, температура ґрунту майже не змінюється протягом року й перебуває в діапазоні близько 10–14 °С. Це створює природний «тепловий коридор», який визначає базовий рівень температури в підземних просторах.

Разом із тим на температуру суттєво впливають техногенні фактори. До них належить тепловиділення від рухомого складу, яке утворюється за рахунок роботи електродвигунів, освітлювальних систем, гальмівних механізмів і тертя між колесами та рейками. У години пікового навантаження температура може підвищуватися до значень, що перевищують комфортний діапазон. Додатковим джерелом тепла є пасажиропотік: кожна людина виділяє близько 80–120 Вт теплової енергії, що у скупчених умовах значно впливає на мікроклімат.

Не менш важливим фактором є робота інженерних систем. У підземних спорудах експлуатується велика кількість обладнання — насоси, ескалатори,

системи вентиляції, електронні модулі та серверне устаткування. Всі ці елементи виділяють тепло, яке накопичується у просторі з обмеженим природним повітрообміном.

Температура повітря має безпосередній вплив на безпеку експлуатації. Невідповідність температурних умов може призвести до перегріву електронних компонентів, збоїв у роботі автоматики, прискореного старіння ізоляційних матеріалів та зниження ресурсу обладнання. Занадто низька температура може викликати появу конденсату на поверхнях, що є загрозою для електричних систем і сприяє розвитку корозійних процесів. Конденсація водяної пари стає причиною виходу з ладу контакторів, релейних блоків, кабельних систем та інших елементів інфраструктури.

Температурний режим має також велике значення для енергоефективності. Системи вентиляції й кондиціонування витрачають значні ресурси на підтримання оптимальних умов, і неточний або несвоєчасний контроль температури може спричинити перевищення енергоспоживання на десятки відсотків. Ефективна інформаційно-вимірювальна система дає змогу оптимізувати роботу вентиляційних установок шляхом адаптивного регулювання витрати повітря, зменшення перегріву зон з інтенсивними тепловиділеннями та стабілізації температури у критично важливих приміщеннях.

Для забезпечення точного контролю температури використовуються сучасні засоби вимірювання: терморезисторні датчики, термопари, цифрові сенсори та інфрачервоні безконтактні прилади. Вони забезпечують високий рівень точності та надійності в умовах підвищеної вологості, запиленості й вібрацій. Датчики розміщуються у тунелях, на платформах, у вентиляційних каналах та технологічних приміщеннях, що дозволяє формувати просторово-розподілену картину температурного стану об'єкта. Дані від цих пристроїв надходять до центральної системи моніторингу, де аналізуються в реальному часі й використовуються для керування кліматичними установками.

Таким чином, температура повітря є одним із базових індикаторів мікроклімату в підземних транспортних спорудах, що впливає на безпеку, комфорт та працездатність обладнання. Її точний і безперервний контроль є необхідною умовою ефективної роботи підземної інфраструктури та основою інтегрованих систем керування мікрокліматом.

#### 1.4 Вологість повітря

Підвищена вологість прискорює руйнування конструкцій, призводить до утворення конденсату, знижує ефективність роботи електронних систем. Контроль вологості є критичним для попередження корозії й забезпечення стабільної роботи вентиляційного обладнання.

Вологість повітря є одним із домінуючих факторів, що визначають якість мікроклімату в підземних транспортних спорудах. Вона має суттєвий вплив на корозійну активність середовища, працездатність електротехнічного обладнання, безпеку пасажирів і персоналу, а також на довговічність будівельних конструкцій [7-9]. Підземні простори характеризуються більш високою та нестабільною вологістю порівняно з наземними об'єктами, що пов'язано з особливостями їхнього розташування та експлуатації.

Основним джерелом підвищеної вологості є геологічні умови. Підземні транспортні споруди, розміщені на значній глибині, часто перебувають у середовищі з підвищеною вологістю ґрунту. Підземні води, капілярне зволоження конструкцій, фільтрування через мікротріщини та дифузія водяної пари створюють постійний природний потік вологи. Це формує фон, на який накладаються техногенні чинники.

Суттєвий вплив на вологість має пасажиропотік. Кожна людина виділяє в повітря значну кількість водяної пари, особливо в умовах високої щільності пасажирів, що характерно для станцій метро у години пік. Додатковим джерелом вологовиділення є рухомий склад: нагрівання поверхонь вагонів,

вентиляційних систем та механічних вузлів сприяє випаровуванню й накопиченню вологи у замкненому просторі.

Підвищена вологість негативно впливає на стан будівельних конструкцій. Металеві елементи швидше піддаються корозії, що значно зменшує їх довговічність. Корозійні процеси прискорюються у випадках, коли вологість поєднується з підвищеною температурою та забрудненнями, характерними для підземного середовища. Бетонні конструкції також схильні до руйнування через цикли зволоження та висихання, а в зонах проникнення солей — через внутрішню кристалізацію та мікротріщини.

Особливо небезпечним є вплив вологості на електротехнічні системи. Висока вологість сприяє появі конденсату на поверхнях контактних елементів, клемних з'єднань, кабельних трас, релейних блоків і систем керування. Конденсат викликає короткі замикання, вихід з ладу захисної автоматики, зниження електричної ізоляції та підвищення ризику аварій. У деяких випадках підвищена вологість є однією з причин збоїв у роботі систем сигналізації та зв'язку.

Контроль вологості важливий і з точки зору санітарно-гігієнічних вимог. Висока вологість створює умови для розвитку грибків, цвілі та патогенних мікроорганізмів. Це може становити загрозу для здоров'я пасажирів і працівників, особливо у зонах з недостатнім повітрообміном. Крім того, надмірна вологість знижує якість повітря та сприяє накопиченню неприємних запахів.

Підтримання оптимального діапазону вологості (зазвичай 40–70% для підземних об'єктів) є одним із завдань інформаційно-вимірювальної системи. Для цього застосовуються високотехнологічні сенсори відносної вологості, які здатні стабільно працювати в умовах запиленості, агресивних газів та перепадів температур. Датчики розміщуються у вентиляційних шахтах, тунелях, технічних приміщеннях, на станціях та у зонах з підвищеною корозійною активністю. Отримані дані обробляються в режимі реального часу, що дозволяє

виявляти критичні зміни та оперативно регулювати роботу вентиляційного обладнання.

Правильний контроль вологості дозволяє мінімізувати корозію, зберегти довговічність конструкцій, забезпечити надійну роботу електротехнічних систем і покращити умови перебування людей у підземних транспортних спорудах. Таким чином, вологість є одним із найбільш значущих параметрів мікроклімату, який визначає рівень безпеки й ефективності функціонування інфраструктури.

### 1.5 Концентрація вуглекислого газу (CO<sub>2</sub>)

CO<sub>2</sub> є основним індикатором повітрообміну. Надмірна концентрація в підземних спорудах може спричинити погіршення самопочуття людей, головний біль і підвищену втоми.

Концентрація вуглекислого газу (CO<sub>2</sub>) є одним із ключових індикаторів якості повітря та ефективності вентиляційних процесів у підземних транспортних спорудах [10-13]. На відміну від деяких інших шкідливих газів, CO<sub>2</sub> сам по собі не є токсичним на низьких концентраціях, проте його підвищений вміст безпосередньо впливає на самопочуття людей, рівень безпеки, ефективність роботи вентиляційних систем та функціонування технологічного обладнання.

У підземних просторах CO<sub>2</sub> накопичується значно швидше, ніж у відкритих або наземних приміщеннях, через обмежений природний повітрообмін та високу щільність пасажиропотоку. Основним джерелом утворення вуглекислого газу є дихання людей: кожна людина виділяє приблизно 15–20 літрів CO<sub>2</sub> на годину. У години пік, коли одночасно у станційних залах перебувають сотні або тисячі пасажирів, концентрація CO<sub>2</sub> різко зростає і може сягати значень, що перевищують рекомендовані норми.

Додатковими джерелами CO<sub>2</sub> є технічні процеси: робота двигунів рухомого складу, гальмівних систем, інженерного обладнання та вентиляційних

камер. Частина CO<sub>2</sub> може надходити з автомобільних тунелів, якщо йдеться про підземні транспортні розв'язки або паркінги.

Висока концентрація CO<sub>2</sub> негативно впливає на самопочуття людей. При перевищенні рівня у 1000 ppm з'являється відчуття духоти, знижується концентрація уваги, виникає сонливість. На рівні 1500–2000 ppm можливе погіршення когнітивних функцій, головний біль, втома. Ще вищі концентрації призводять до істотного дискомфорту і можуть становити небезпеку для людей із захворюваннями дихальної системи та серцево-судинними проблемами. Підвищений рівень CO<sub>2</sub> також погіршує ефективність циркуляції повітря та ускладнює роботу вентиляційних систем, які змушені працювати у посиленому режимі, що збільшує енергоспоживання і прискорює знос обладнання.

Для оцінки якості повітря в підземних транспортних спорудах концентрація CO<sub>2</sub> є найбільш інформативним параметром, тому що вона чітко корелює з інтенсивністю перебування людей у просторі та ефективністю вентиляції. Якщо вентиляційна система не встигає забезпечувати нормальний повітрообмін, рівень CO<sub>2</sub> зростає одним із перших. Саме тому його постійний контроль дозволяє оперативно реагувати на зміни мікроклімату.

Сучасні інформаційно-вимірювальні системи використовують високоточні інфрачервоні (NDIR) сенсори для вимірювання концентрації CO<sub>2</sub>. Вони здатні працювати у складних умовах, що характерні для підземних об'єктів: підвищена запиленість, вологість, газові домішки, вібрації. Дані від сенсорів надходять до автоматизованих систем моніторингу, де порівнюються з нормативними значеннями та застосовуються для регулювання режимів вентиляції. Ці системи можуть автоматично збільшувати продуктивність вентиляторів, відкривати або закривати повітряні клапани, оптимізувати напрямок повітряних потоків.

Контроль CO<sub>2</sub> також важливий для запобігання критичним ситуаціям. У тунелях та технічних зонах підвищення концентрації CO<sub>2</sub> може сигналізувати про збої у роботі вентиляційних камер, заблоковані повітроводи або

несправність систем очищення повітря. У рухомому складі це свідчить про недостатню роботу припливної вентиляції або витікання повітряних каналів.

Забезпечення нормативного рівня концентрації CO<sub>2</sub> (зазвичай до 1000 ppm у громадських підземних просторах) є важливою умовою безпеки і комфорту пасажирів. Ефективний контроль та автоматизований аналіз даних дозволяють підтримувати оптимальну якість повітря, зменшувати навантаження на вентиляційні системи та забезпечувати надійну експлуатацію підземних транспортних інфраструктур.

### 1.6 Концентрація чадного газу (CO)

Особливо важливо контролювати в тунелях, паркінгах та приміщеннях, де можливі продукти згоряння. CO є токсичним газом, тому його вміст має підтримуватися на мінімально можливому рівні.

Концентрація чадного газу (CO) є одним із найбільш небезпечних параметрів мікроклімату в підземних транспортних спорудах, оскільки CO належить до високотоксичних газів. Він не має запаху, кольору або смаку, що робить його особливо підступним: людина не здатна визначити його присутність без спеціальних засобів контролю [14-18]. У закритих і погано вентиляваних підземних приміщеннях чадний газ може накопичуватися до небезпечних концентрацій, створюючи загрозу для життя та здоров'я.

Основним джерелом CO є процеси неповного згоряння вуглецевмісного палива. У підземних транспортних спорудах його поява найчастіше пов'язана з рухом автотранспорту (у транспортних тунелях, підземних паркінгах), а також із роботою деяких типів технічного обладнання, що використовують двигуни внутрішнього згоряння або газові установки. Навіть короткочасне перебування транспортних засобів у замкнених просторах може спричинити накопичення CO до небезпечних рівнів, якщо вентиляція не працює належним чином.

Небезпека CO полягає у його здатності швидко зв'язуватися з гемоглобіном крові, утворюючи карбоксигемоглобін. При цьому кров втрачає здатність переносити кисень, що призводить до гострого кисневого голодування організму. Вже при концентраціях 50–100 ppm з'являються перші симптоми отруєння: головний біль, запаморочення, слабкість. При рівні понад 200 ppm спостерігається різке погіршення самопочуття, прискорене серцебиття, шум у вухах. Концентрації понад 400 ppm становлять серйозну загрозу життю, а рівні вище 800–1000 ppm можуть викликати втрату свідомості та летальний наслідок упродовж короткого часу.

Підземні транспортні споруди характеризуються обмеженим повітрообміном, що створює умови для швидкого накопичення CO навіть при незначному надходженні. У тунелях, де можливий рух автомобілів, концентрація CO може зростати внаслідок утворення вихлопних газів під час прискорення, гальмування або зупинок транспорту. У підземних паркінгах особливо небезпечними є зони, де автомобілі довго працюють на холостому ходу. Аналогічно, у технічних приміщеннях підземних транспортних систем джерелами CO можуть бути резервні дизель-генератори або інші згоряючі установки.

Оскільки чадний газ не може бути виявлений органами чуття людини, інформаційно-вимірювальні системи відіграють вирішальну роль у забезпеченні безпеки. Для моніторингу концентрації CO використовуються високочутливі електрохімічні сенсори, які здатні виявляти навіть мінімальні відхилення від безпечних норм. Ці датчики розміщуються у найвразливіших точках: у вентиляційних шахтах, під стелею тунелів, на виїздах та в'їздах підземних паркінгів, у технічних зонах, де можливі викиди продуктів згоряння.

Зібрані дані аналізуються автоматизованою системою моніторингу. При виявленні підвищених концентрацій відбувається негайне включення інтенсивного режиму вентиляції, подається сигнал тривоги, а в критичних ситуаціях може бути здійснено автоматичне перекриття доступу до споруди або

зупинка транспорту. Такий алгоритм є необхідним, оскільки навіть коротка затримка в реагуванні може мати серйозні наслідки.

Крім прямих ризиків для людей, підвищена концентрація CO негативно впливає на роботу обладнання. Газ є продуктом згоряння, у складі якого часто присутні домішки, що сприяють корозії металів та забрудненню вентиляційних фільтрів. Наявність CO у повітрі свідчить про неефективну вентиляцію або несправність обладнання, що потребує негайної діагностики.

Забезпечення безпечної концентрації CO (зазвичай не більше 20–30 ppm для підземних об'єктів) є обов'язковою умовою експлуатації транспортних споруд. Постійний моніторинг, точні сенсори та автоматизовані системи реагування дозволяють мінімізувати ризики отруєння, забезпечувати надійність інфраструктури та створювати безпечні умови для пасажирів і персоналу.

### 1.7 Запиленість та концентрація зважених часток (PM)

Пил негативно впливає на здоров'я людей, забруднює обладнання, прискорює знос механічних елементів. У системах метрополітену запиленість часто підвищується через тертя металевих поверхонь (коліс і рейок).

Запиленість та концентрація зважених часток (PM — particulate matter) є одним із найважливіших параметрів мікроклімату, що визначають якість повітря та загальну безпечність підземних транспортних споруд. [19-21] В умовах замкненого простору пил має тенденцію до накопичення, підвищення концентрації та утворення стійкого аерозольного середовища, що становить небезпеку як для здоров'я людей, так і для технічного обладнання.

Підземні транспортні споруди — метро, тунелі, підземні паркінги — характеризуються специфічним набором джерел запиленості, які відрізняються від наземних середовищ. Основним джерелом зважених часток є механічне стирання елементів інфраструктури. У метрополітені це тертя між колесами рухомого складу та рейками, зношування гальмівних колодок, елементів контактної мережі, а також частинок бетону та облицювальних матеріалів, що

піддаються вібраційним навантаженням. У паркінгах та автомобільних тунелях головними джерелами пилу є зношення шин, гальмівних систем, дорожнього покриття й турбулентні повітряні потоки, створені транспортними засобами.

До складу зважених часток входять:

- PM10 — частинки діаметром менше 10 мкм;
- PM2.5 — дрібнодисперсні частинки, менші за 2.5 мкм;
- PM1 — ультрадисперсні частинки, які мають особливо небезпечний

вплив на організм.

Дрібнодисперсний пил становить найбільшу небезпеку, оскільки він здатен проникати глибоко в дихальні шляхи, осідати в легенях та навіть потрапляти у кровообіг. При тривалому впливі високих концентрацій PM у людей можуть виникати респіраторні захворювання, алергічні реакції, загострення хронічних хвороб та загальне погіршення самопочуття. У підземних спорудах, де повітрообмін обмежений, навіть невелике збільшення концентрації PM може зберігатися тривалий час, що робить контроль цього параметра особливо актуальним.

Запиленість також негативно впливає на роботу обладнання. Пил осідає на поверхнях електронних модулів, вентиляційних каналів, фільтрів, кабельних трас, контактних груп та рухомих вузлів. Це може призводити до перегріву електроніки, зниження ефективності вентиляційних систем, збільшення енергоспоживання, швидкого засмічення фільтрів та прискореного зношування технічних елементів. У середовищі з високою вологістю пил створює липкі відкладення, які є ще більш шкідливими та важко видаляються.

Великі скупчення пилу можуть становити пожежну небезпеку, особливо при наявності металевих дрібнодисперсних частинок, характерних для метрополітенів. Металевий пил, утворений внаслідок тертя коліс о рейки, у певних умовах може бути вибухонебезпечним, що є додатковим аргументом на користь безперервного моніторингу цього параметра.

Сучасні інформаційно-вимірювальні системи для моніторингу запиленості використовують оптичні та лазерні сенсори, здатні визначати

концентрацію часток у різних діапазонах РМ. Завдяки високій чутливості такі датчики дозволяють виявляти навіть незначні зміни у складі повітря. У підземних спорудах їх зазвичай встановлюють у тунельних вентиляційних каналах, технічних приміщеннях, безпосередньо на платформах та у зонах з інтенсивним рухом транспорту.

Дані щодо концентрації зважених часток надходять до системи моніторингу у режимі реального часу. На підставі цих даних система може автоматично регулювати роботу вентиляційних агрегатів, посилювати фільтрацію повітря, змінювати напрям подачі повітряних потоків або подавати попереджувальні сигнали при перевищенні встановлених нормативів. У сучасних системах управління мікрокліматом запиленість розглядається як один із базових контрольованих параметрів нарівні з температурою, вологістю та рівнем газових забруднень.

Підтримання концентрації зважених часток у межах встановлених нормативів забезпечує безпечні умови перебування пасажирів, підвищує надійність систем вентиляції, продовжує строк служби технічного обладнання та сприяє стабільній роботі всієї інфраструктури підземної транспортної системи.

#### 1.8 Концентрація вибухонебезпечних та токсичних газів ( $\text{NO}_x$ , $\text{SO}_2$ , $\text{CH}_4$ тощо)

У певних типах тунелів можливі накопичення газів техногенного чи природного походження, що створює загрозу аварійних ситуацій.

Контроль концентрації вибухонебезпечних та токсичних газів у підземних транспортних спорудах є критично важливим елементом системи забезпечення безпеки [22-24]. До цієї групи належать гази, які можуть становити загрозу здоров'ю людей, спричиняти корозію обладнання, погіршувати якість повітря або створювати вибухонебезпечне середовище. Серед найпоширеніших газів цього типу в підземних об'єктах виділяють

оксиди азоту ( $\text{NO}_x$ ), діоксид сірки ( $\text{SO}_2$ ), метан ( $\text{CH}_4$ ) та інші домішки, що утворюються внаслідок техногенних процесів.

Оксиди азоту ( $\text{NO}_x$ ), які включають монооксид азоту ( $\text{NO}$ ) та діоксид азоту ( $\text{NO}_2$ ), утворюються переважно при високотемпературному згорянні палива. У транспортних тунелях та підземних паркінгах основним джерелом цих газів є автомобільні двигуни.  $\text{NO}_2$  має сильний подразнювальний ефект на дихальні шляхи, здатний викликати бронхоспазми, погіршення самопочуття та накопичувальні негативні наслідки при тривалому впливі. В умовах недостатньої вентиляції концентрація  $\text{NO}_x$  може швидко досягати гранично допустимих значень.

Діоксид сірки ( $\text{SO}_2$ ) також належить до небезпечних газів, утворюючись внаслідок згорання палива з домішками сірки та роботи деяких технічних установок. Він має різкий запах і діє як сильний подразник слизових оболонок. У поєднанні з дрібнодисперсним пилом  $\text{SO}_2$  може утворювати агресивні сполуки, які сприяють корозії металевих елементів, руйнуванню бетонних конструкцій та зниженню ресурсу обладнання. У підземних об'єктах навіть низькі концентрації  $\text{SO}_2$  можуть негативно впливати на інфраструктуру, особливо у вологому середовищі.

Метан ( $\text{CH}_4$ ) має іншу природу небезпеки. Він не є токсичним у звичних концентраціях, проте належить до вибухонебезпечних газів. Вибух метану можливий при певному співвідношенні газу та повітря (зазвичай у діапазоні 5–15%). У підземних спорудах метан може потрапляти внаслідок природних геологічних викидів, просочування газопостачальних систем або внаслідок аварійних ситуацій. Накопичення метану без оперативного контролю становить суттєву загрозу руйнування споруди та загибелі людей.

До цієї групи також можуть належати інші небезпечні гази, зокрема леткі органічні сполуки, сірководень ( $\text{H}_2\text{S}$ ), аміак ( $\text{NH}_3$ ) та озон ( $\text{O}_3$ ), які можуть утворюватися під час технічних аварій, витоків або електродугових процесів. Багато з них мають низький поріг токсичності, швидко розповсюджуються у повітрі та здатні вражати нервову або дихальну систему людини.

У підземних транспортних спорудах характерною є обмежена циркуляція повітря, що створює умови для швидкого накопичення токсичних і вибухонебезпечних газів при найменших порушеннях вентиляційних режимів. Тому використання інформаційно-вимірювальних систем є обов'язковою умовою безпечної експлуатації таких споруд. Для моніторингу концентрації небезпечних газів застосовуються електрохімічні сенсори, інфрачервоні газоаналізатори та каталізаторні датчики, які забезпечують високоточне визначення концентрацій у режимі реального часу.

Система моніторингу отримує дані з датчиків, аналізує їх та активує необхідні сценарії безпеки: посилення вентиляції, увімкнення аварійної сигналізації, обмеження доступу до небезпечних зон або автоматичне відключення обладнання. Завдяки такому підходу вдається попередити аварійні ситуації, мінімізувати вплив шкідливих домішок на здоров'я людей та забезпечити довготривалу надійну роботу всієї інфраструктури.

### 1.9 Швидкість та напрям повітряного потоку

Дозволяє оцінити ефективність роботи вентиляційних систем та забезпечити прогноз поведінки газових домішок у разі аварії.

Швидкість та напрям повітряного потоку є одними з основних характеристик мікроклімату в підземних транспортних спорудах, оскільки вони безпосередньо визначають ефективність вентиляції, рівень розбавлення шкідливих домішок у повітрі, комфорт пасажирів та безпеку персоналу. Ці параметри формують повітрообмін у замкненому просторі, впливають на розподіл температури, вологи, газових забруднень та зважених часток.

У підземних спорудах природна циркуляція повітря практично відсутня, тому всі повітряні потоки створюються за рахунок роботи механічних вентиляційних систем або руху транспортних засобів [25]. Це робить вимірювання швидкості та напрямку повітря ключовими для оцінювання ефективності вентиляційної інфраструктури. Якщо швидкість повітря

недостатня, забруднення, такі як CO, NO<sub>x</sub>, пил чи вологість, можуть накопичуватися до небезпечних рівнів. Навпаки, надмірно висока швидкість може створювати дискомфорт, підвищувати тепловтрати, викликати турбулентність та нераціональне перемішування повітряних потоків.

Напрямок повітряного потоку має важливе значення для організації правильного повітрообміну. Неправильна орієнтація повітряних потоків може призводити до рециркуляції шкідливих газів, утворення застійних зон, де накопичуються токсичні речовини, а також до перенесення пилу або сторонніх запахів у зони, призначені для пасажирів. У транспортних тунелях напрям повітря повинен узгоджуватися з напрямом руху транспортних засобів, щоб ефективно відводити вихлопні гази та теплові навантаження. У метрополітені важливим є врахування руху поїздів, що створює так званий «поршневий ефект», який значно впливає на структуру повітряних потоків.

Вимірювання швидкості повітря проводиться за допомогою анемометрів — термоанемометричних, ультразвукових або механічних датчиків. Такі прилади дозволяють визначити не лише максимальні та середні швидкості, а й векторний напрям руху потоків. В умовах підземних споруд, де структура повітряних потоків є складною через численні коридори, шахти та технічні приміщення, особливо важливим є контроль саме напрямку потоку, оскільки він впливає на ефективність загальної системи вентиляції.

Інформаційно-вимірювальні системи в режимі реального часу збирають дані про повітряні потоки з кількох точок — у тунелях, вентиляційних шахтах, на платформах та у технічних зонах. На підставі цих даних система керування вентиляцією автоматично змінює режим роботи вентиляторів, регулює положення заслінок, підлаштовує інтенсивність подачі або відбору повітря. Це дозволяє забезпечити збалансовану циркуляцію, підтримати нормативний рівень якості повітря, мінімізувати накопичення домішок та забезпечити безпечні умови перебування людей.

З точки зору безпеки швидкість та напрям потоку мають вирішальне значення у випадку аварійних ситуацій. Під час задимлення або витoku газів

правильне спрямування повітря дозволяє локалізувати небезпеку, зменшити концентрацію токсичних речовин та забезпечити можливість евакуації. Тому сучасні системи вентиляції передбачають аварійні алгоритми, які автоматично змінюють напрям потоків для мінімізації впливу небезпечних факторів.

Забезпечення оптимальної швидкості та правильно організованого напрямку повітряного потоку є невід'ємною складовою ефективною системи мікрокліматичного контролю. Це сприяє створенню безпечних, комфортних та стабільних умов для експлуатації підземних транспортних споруд, підвищує ефективність роботи вентиляційних систем та продовжує термін служби обладнання.

#### 1.10 Функціональні вимоги до ІВС контролю мікроклімату

Після проведення детального аналізу всіх основних параметрів мікроклімату їх взаємозв'язки та взаємний вплив були узагальнені й представлені у вигляді структурної схеми. Такий рисунок дозволяє наочно продемонструвати, як окремі величини — температура, вологість, газові концентрації, рівень запиленості та характеристики повітряного потоку — не лише визначають стан підземного середовища, але й безпосередньо впливають одна на одну.

Візуалізація взаємодій підкреслює комплексний характер мікроклімату (рис. 1.3), у якому зміна одного параметра здатна спричинити каскад змін у суміжних показниках, що необхідно враховувати під час розробки ІВС та побудови алгоритмів контролю й регулювання.

У межах аналізу параметрів мікроклімату встановлено, що кожен із них має власну вагомість, тобто ступінь впливу на загальний стан повітряного середовища в підземних транспортних спорудах. Ваговий коефіцієнт відображає (рис. 1.4), наскільки критичним є той чи інший показник для забезпечення безпеки людей, стабільної роботи вентиляційного обладнання та відповідності нормативним вимогам. Наприклад, токсичні гази можуть мати

вищий пріоритет реагування, тоді як параметри температури або вологості мають більш плавний характер впливу.

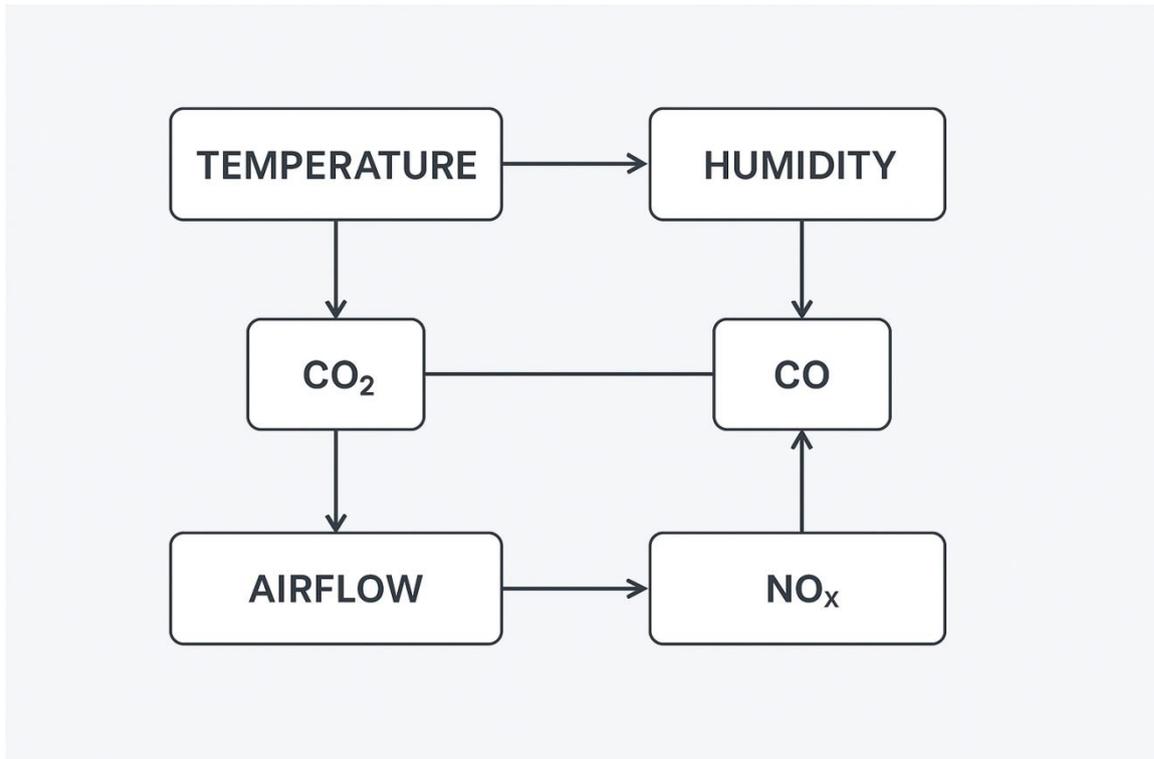


Рисунок 1.3 – Візуалізація взаємодій параметрів мікроклімату

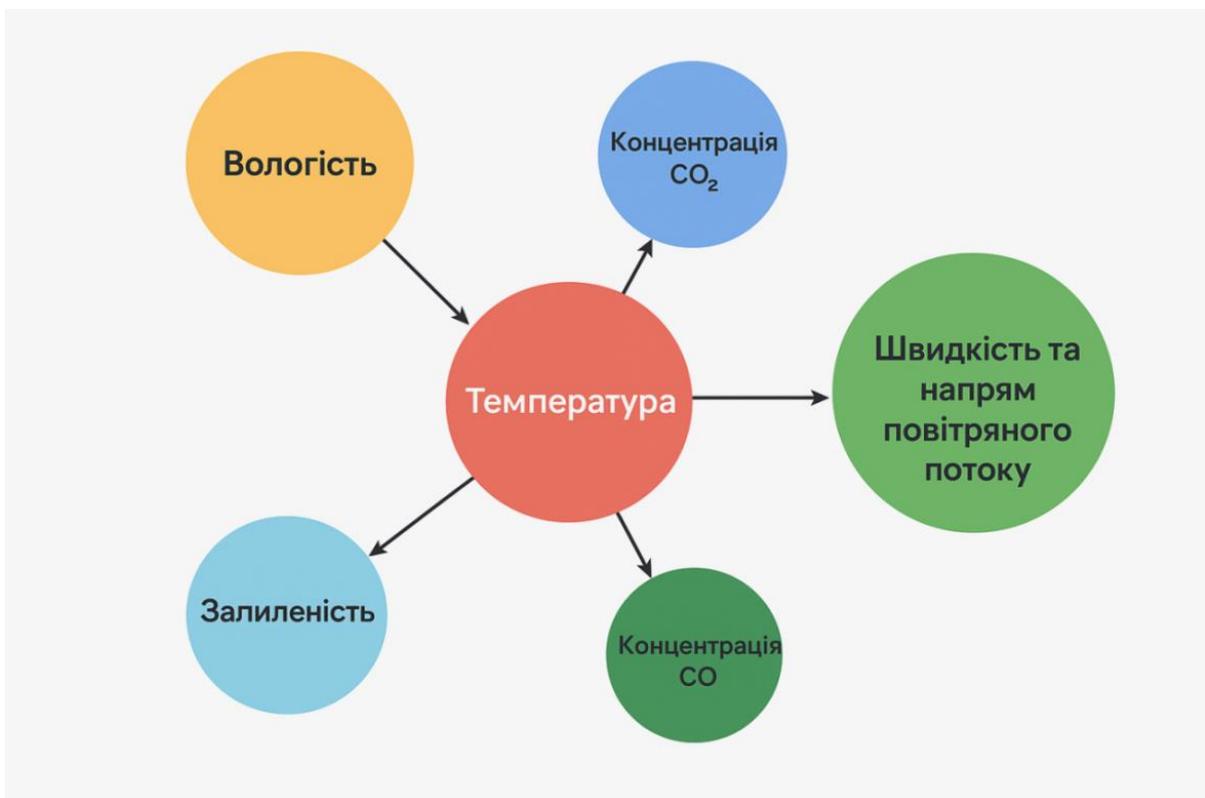


Рисунок 1.4 – Візуалізація вагомості параметрів мікроклімату

У межах аналізу параметрів мікроклімату встановлено, що кожен із них має власну вагомість, тобто ступінь впливу на загальний стан повітряного середовища в підземних транспортних спорудах. Ваговий коефіцієнт відображає, наскільки критичним є той чи інший показник для забезпечення безпеки людей, стабільної роботи вентиляційного обладнання та відповідності нормативним вимогам. Наприклад, токсичні гази можуть мати вищий пріоритет реагування, тоді як параметри температури або вологості мають більш плавний характер впливу.

У візуальній схемі ці вагові коефіцієнти були відображені у вигляді різних за розміром елементів (бульбашок), де більший розмір символізує вищу вагу параметра у формуванні мікроклімату. Однак аналіз показує, що в умовах підземних транспортних споруд майже всі параметри мають порівнянний ступінь важливості, оскільки навіть незначні відхилення будь-якого з них можуть створювати ризик небезпеки або порушення нормальної роботи об'єкта.

Таким чином, у нашому випадку коефіцієнти ваги є практично однаковими, що чітко простежується на рисунку. Це підкреслює комплексний характер мікроклімату, де всі параметри мають взаємозалежний і важливий вплив, а ІВС повинна забезпечувати рівномірно високий пріоритет контролю для кожного з них.

Інформаційно-вимірювальна система контролю параметрів мікроклімату в підземних транспортних спорудах повинна бути комплексом, здатним працювати в умовах підвищених вимог до надійності, точності та безперервності контролю. Оскільки підземний простір характеризується обмеженим повітрообміном, високим ризиком утворення небезпечних концентрацій шкідливих газів та часток, а також великими потоками людей, ІВС має виконувати не лише роль вимірювального пристрою, а бути інтегрованим елементом інженерної інфраструктури.

Кожна функціональна вимога, наведена нижче, формує технічні обмеження та визначає архітектуру майбутньої ІВС, що дозволить у

наступному розділі перейти до вибору сенсорів, апаратних модулів, обчислювальних вузлів та алгоритмів.

Безперервний моніторинг параметрів у реальному часі. ІВС повинна забезпечувати безперервне, цілодобове вимірювання ключових параметрів мікроклімату. Це означає, що система повинна працювати в режимі постійного збору даних без пауз, затримок чи втрат інформації. Дані мають надходити з заданою дискретністю (наприклад, 1 раз на секунду або 1 раз на хвилину залежно від параметра). Такий режим дозволяє оперативно реагувати на будь-які зміни середовища та швидко виявляти небезпечні ситуації.

З технічної точки зору це передбачає вибір сенсорів із низьким часом відгуку, використання надійних каналів зв'язку та забезпечення відмовостійкості вимірювальних модулів.

Висока точність вимірювань у складних умовах експлуатації. Підземні транспортні споруди характеризуються великими перепадами температури, високою вологістю, запиленістю, наявністю агресивних газів, а також вібраціями від проходження поїздів та автомобілів. Тому ІВС має використовувати сенсорні модулі з підвищеною стабільністю показів, температурною компенсацією та захистом від забруднень.

Точність є критичною, оскільки багато параметрів (CO, NO<sub>2</sub>, пил PM2.5) мають низькі допустимі межі, і навіть незначне відхилення може призвести до недооцінки безпеки.

У технічній частині це перехід до обґрунтування вибору конкретних моделей сенсорів, їхніх паспортних характеристик, типів калібрування та методів компенсування похибок.

Автоматизований збір, обробка та архівація даних. Система має не лише збирати дані, а й забезпечувати їхнє попереднє опрацювання (фільтрацію шумів, усереднення, виявлення аномалій), реєстрацію та довготривале зберігання. Архівування необхідне для аналізу тенденцій, побудови звітів, оцінки ефективності вентиляції та створення прогнозних моделей.

Для цього потрібен обчислювальний модуль — локальний або серверний — який виконуватиме ці функції. У технічному розділі це дозволить перейти до опису архітектури програмного забезпечення, форматів даних, необхідних обсягів пам'яті та каналів зв'язку.

Передача інформації до диспетчерських центрів. Важливою вимогою є можливість оперативного надсилання даних у диспетчерський або контрольний центр. Передача має бути захищеною, стабільною та доступною через різні типи зв'язку (дротовий Ethernet, волоконно-оптичні канали, бездротові технології у резервних сценаріях).

Це дає змогу операторам у реальному часі контролювати стан мікроклімату та швидко ухвалювати рішення. Технічно це означає необхідність реалізації протоколів телеметрії (MQTT, Modbus TCP, OPC UA тощо) та забезпечення сумісності з існуючою інфраструктурою диспетчеризації.

Своєчасна генерація попереджень і аварійних повідомлень. ІВС повинна автоматично формувати попереджувальні та аварійні сигнали при будь-яких відхиленнях параметрів від допустимих меж. Наприклад, при різкому зростанні CO, перевищенні рівня PM<sub>2.5</sub>, зниженні вентиляційного тиску або появи вибухонебезпечних газів.

Система має класифікувати події за рівнем важливості: інформаційні, попереджувальні, аварійні.

Інтеграція з системами вентиляції та безпеки. Однією з ключових характеристик ІВС є здатність взаємодіяти з іншими інженерними системами: вентиляційними агрегатами, системами оповіщення, аварійного відключення та протидимного захисту. При підвищенні концентрації небезпечних газів система повинна автоматично посилювати вентиляцію, а в критичних випадках — запускати протидимну автоматику або надсилати команди блокування доступу. У технічному розділі це створює основу для опису інтерфейсів комунікацій (реле, PLC, CAN-шини, промислові протоколи), а також принципових схем керування.

Стійкість до агресивного середовища, вібрацій і забруднень. Усі компоненти ІВС повинні бути розраховані на роботу у складному підземному середовищі. Це передбачає:

- герметичні корпуси з класом захисту не нижче IP65–IP67;
- антикорозійні матеріали;
- демпфування від вібрацій;
- захист від пилу та конденсату;
- термостійкість і стабільність показів сенсорів.

Таке конструктивне виконання гарантує, що ІВС зможе стабільно працювати упродовж тривалого часу. Це дозволить у наступному розділі перейти до вибору технічних корпусів, електронних модулів, типів кабелів, роз'ємів та захисних оболонок.

Реалізація описаних функцій дозволяє ІВС переходити з категорії звичайного вимірювального комплексу до повноцінної частини інтелектуальної інфраструктури підземних транспортних систем. Створюється основа для автоматизованого, саморегульованого середовища, здатного мінімізувати ризики, оптимізувати енергоспоживання та забезпечувати безпеку людей.

Технічне обґрунтування важливості ГДК для інтеграції в ІВС. Гранично допустимі концентрації (ГДК) є одним із ключових нормативних параметрів, що визначають режими роботи інформаційно-вимірювальної системи мікрокліматичного контролю. Введення точних значень ГДК у структуру ІВС має принципове значення, оскільки ці параметри формують основу логічного функціонування системи, визначають порогові рівні спрацювання алгоритмів аналізу та регулювання, а також забезпечують відповідність експлуатації об'єкта чинним нормам безпеки.

ГДК виступають базовими величинами, з якими порівнюються отримані сенсорні показники в реальному часі. На їх основі система здійснює автоматичну класифікацію стану повітряного середовища — нормальний, передаварійний або аварійний. Це дає змогу ІВС своєчасно генерувати сигнали попередження, виконувати коригувальні дії або активувати аварійні сценарії.

Таким чином ГДК є фундаментом формування логіки реакції системи, а не просто довідковими значеннями.

З технічної точки зору, ГДК [26-31] інтегруються як статичні або динамічно змінні параметри програмного забезпечення. У випадку статичного режиму значення закладаються в конфігураційні файли або прошивку контролерів, тоді як у динамічному — оператор або адміністратор може змінювати нормативи відповідно до нових стандартів або особливостей експлуатації підземної інфраструктури. Це вимагає реалізації окремих інтерфейсів для введення, збереження та актуалізації таких стандартів, що буде детально описано у розділі технічного проектування.

Параметри ГДК також визначають алгоритми обробки масивів даних. Наприклад, для газів з високою токсичністю (CO, NO<sub>2</sub>) система повинна мати короткі інтервали аналізу, швидший час реакції, застосовувати гістерезис для уникнення коливань порогів та забезпечувати пріоритетність обробки їхніх показників. Для пилових часток (PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub>) необхідне усереднення значень у часовому вікні, що узгоджується із санітарними нормами. Таким чином ГДК визначають конфігурацію алгоритмів фільтрації, нормалізації, порівняння та аналізу показників.

Окрім цього, відповідність вимірних параметрів ГДК є юридично важливим аспектом. Підземні транспортні споруди підлягають регуляторному контролю, і автоматизована фіксація перевищень ГДК дозволяє забезпечувати прозору звітність, проводити аудит безпеки та документувати аварійні події. Це вимагає від ІВС реалізації захищеного архівування даних з маркуванням подій перевищення нормативів.

Таким чином, значення ГДК, закладені в ІВС (таблиця 1.1), визначають як її функціональну поведінку, так і відповідність експлуатації об'єкта вимогам безпеки. У наступному технічному розділі це стане основою для вибору архітектури контролерів, структури програмного забезпечення, логіки опрацювання сигналів та параметрів захисних реакцій системи.

Таблиця 1.1 – Основні параметри мікроклімату та концентрації домішок, які підлягають постійному контролю в підземних транспортних спорудах

Параметр / Забруднювач	Орієнтовна ГДК / Рекомендована межа (або рекомендований рівень)	Коментар / Подія вимірювання / Примітка
CO <sub>2</sub> (вуглекислий газ)	~ 1000 ppm (середньодобово / для громадських/заселених просторів)	Показник вентиляції — якщо перевищено, вентиляцію слід посилити.
CO (чадний газ, монооксид вуглецю)	Наприклад: 4 mg/m <sup>3</sup> (що ~ ≈ 3.5–5 ppm, залежно від температури/тиску) на добу або 2 mg/m <sup>3</sup> за 8 годин роботи приміщення	Має токсичну дію; у підземних паркінгах чи тунелях потрібен жорсткий контроль.
PM <sub>2.5</sub> (дрібнодисперсний пил)	~ 10–15 µg/m <sup>3</sup> (середньорічний) або 25–35 µg/m <sup>3</sup> (24-годинний) як орієнтир — згідно з міжнародними стандартами IAQ / благополучної якості повітря	Важливо для здоров'я дихальних шляхів; підземні простори з обмеженою вентиляцією — критичні.
PM <sub>10</sub> (менш дрібний пил, частки до 10 µm)	~ 50 µg/m <sup>3</sup> (середньорічний) або до 50–100 µg/m <sup>3</sup> як денний/24-годинний граничний рівень (залежно від стандартів)	Для оцінки запиленості — часто використовують як додатковий індикатор до PM <sub>2.5</sub> .
Токсичні/вибухо небезпечні гази (наприклад, NO <sub>2</sub> , SO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> та подібні)	Для NO <sub>2</sub> / SO <sub>2</sub> : ~ 40 µg/m <sup>3</sup> (середньорічний) як орієнтир якості повітря на відкритому повітрі; денні/часові граничні значення можуть бути суттєво вищими — залежно від норм стандартів забруднення повітря	У підземних спорудах ці гази особливо небезпечні через обмежену циркуляцію повітря — потрібен постійний моніторинг.
Швидкість / напрям повітряного потоку	—	Цей параметр не має “ГДК” як такий, але має нормативи про мінімальну/оптимальну швидкість або кратність повітрообміну (залежить від проекту вентиляції).

У таблиці наведено основні параметри мікроклімату та концентрації домішок, які підлягають постійному контролю в підземних транспортних спорудах, а також орієнтовні гранично допустимі або рекомендовані значення для кожного з них. Така систематизація дозволяє чітко визначити нормативні межі, за яких умови перебування людей у підземних просторах залишаються безпечними, а робота технічного обладнання — стабільною.

Параметри мікроклімату та забруднення повітря, представлені у таблиці, охоплюють як фізичні характеристики повітряного середовища (температура, запиленість, повітряні потоки), так і хімічні показники, пов'язані з присутністю шкідливих газів. Зокрема, параметри концентрації CO<sub>2</sub> використовуються переважно для оцінювання ефективності вентиляції та повітрообміну, у той час як чадний газ (CO) та токсичні домішки (NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>) є безпосередньо небезпечними для здоров'я та можуть викликати гострі отруєння. Показники запиленості (PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub>) визначають рівень забрудненості повітря твердими частками, що є критично важливим для підземних приміщень, де пил має тенденцію накопичуватись через обмежений повітрообмін.

Джерела значень ГДК у таблиці базуються на міжнародних стандартах якості повітря, санітарних нормах та технічних рекомендаціях, що застосовуються для оцінки безпечності середовищ із постійною присутністю людей. Наведені цифри є орієнтовними, оскільки конкретні значення можуть змінюватися залежно від національних норм, типу споруди, особливостей її вентиляційної системи й рівня ризику, властивого для конкретного об'єкта. Тим не менш, вони дозволяють сформулювати загальне уявлення про вимоги до якості повітря у підземних транспортних структурах.

Наявність таких даних у роботі є важливим етапом побудови інформаційно-вимірювальної системи, оскільки ГДК слугують вихідними параметрами для розроблення алгоритмів автоматичного контролю, вибору датчиків, визначення критичних режимів роботи вентиляційного обладнання та формування критеріїв безпеки. Системи моніторингу мають забезпечувати не лише фіксацію поточних значень, а й оперативне реагування в разі

перевищення нормативів — від підсилення вентиляції до автоматичного сповіщення або аварійного відключення небезпечного обладнання.

Таким чином, наведена таблиця є узагальненим нормативним фундаментом, на якому базується подальший аналіз мікроклімату та проектування системи контролю параметрів повітря у підземних транспортних спорудах.

Оскільки ІВС здійснює контроль параметрів мікроклімату відповідно до визначених у таблиці гранично допустимих концентрацій, саме ці нормативні значення виступають базовими еталонними величинами, що формують основу метрологічного забезпечення системи та визначають критерії точності, достовірності й коректності усіх вимірювальних процесів.

### 1.11 Висновки до розділу

Проведений теоретичний аналіз параметрів мікроклімату та принципів їхнього контролю у підземних транспортних спорудах дозволяє сформулювати цілісне розуміння необхідності створення сучасної інформаційно-вимірювальної системи (ІВС). Установлено, що мікроклімат підземних інженерних об'єктів має специфічні особливості, зумовлені обмеженням повітрообміном, значними потоками людей, можливим накопиченням токсичних газів та завислих часток, а також нестабільними умовами експлуатації. У таких умовах контроль параметрів навколишнього середовища є критично важливим для забезпечення безпеки, надійності роботи інженерних систем і відповідності нормативним вимогам.

Детально проаналізовані ключові параметри мікроклімату — температура, вологість, концентрації CO<sub>2</sub>, CO, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, метану, пилу PM<sub>2.5</sub>/PM<sub>10</sub>, а також характеристики повітряних потоків — демонструють, що кожен із них впливає як на умови перебування людей, так і на функціонування вентиляційного та інженерного обладнання. Визначено, що навіть короточасні

перевищення допустимих норм можуть становити суттєву небезпеку для здоров'я та створювати ризики аварій, особливо в підземному середовищі.

Особливу увагу приділено значенню гранично допустимих концентрацій (ГДК), які формують нормативний базис для роботи ІВС. Саме ГДК визначають порогові значення для алгоритмів автоматичного сповіщення, вентиляційного регулювання та аварійного керування. Інтеграція ГДК в ІВС є необхідною умовою підтримання безпечних режимів експлуатації, а також забезпечення коректної роботи аналітичних та діагностичних модулів.

Проаналізовані функціональні вимоги до системи — безперервність моніторингу, висока точність сенсорів, автоматизоване опрацювання інформації, передача даних, генерація попереджень, інтеграція з системами безпеки та стійкість обладнання до агресивних впливів — дозволяють сформулювати технічні принципи побудови ІВС. Це створює логічне підґрунтя для наступного розділу, у якому планується перейти до розробки апаратної та програмної архітектури системи.

Таким чином, у цьому розділі:

- обґрунтовано актуальність моніторингу мікроклімату в підземних транспортних спорудах;
- визначено критичні параметри, що потребують контролю;
- систематизовано нормативи ГДК і фізичні характеристики середовища;
- сформульовано комплекс функціональних вимог, які визначають технічну структуру майбутньої ІВС;
- створено науково-технічну основу для переходу до етапу проектування системи.

Отже, проведені теоретичні дослідження забезпечують фундамент для формування технічних рішень і вибору оптимальних методів реалізації інформаційно-вимірювальної системи в межах наступного розділу магістерської роботи.

## **2 АПАРАТНА ТА АЛГОРИТМІЧНА РОЗРОБКА ІНФОРМАЦІЙНО – ВИМІРЮВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ ПАРАМЕТРІВ МІКРОКЛІМАТУ В ПІДЗЕМНИХ ТРАНСПОРТНИХ СПОРУДАХ**

2.1 Розробка функціональної схеми ІВС контролю параметрів мікроклімату в підземних транспортних спорудах

Підземні транспортні споруди, такі як метрополітени, автомобільні та залізничні тунелі, підземні паркінги та пішохідні переходи, є складними інженерними об'єктами. У таких умовах мікроклімат значно відрізняється від надземного середовища, що створює потребу в ефективних системах його контролю. Основними факторами є обмеження природного повітрообміну, наявність джерел забруднень, підвищена вологість та теплові навантаження.

Система контролю мікроклімату забезпечує безпеку людей, надійну роботу інфраструктури та відповідність нормативним вимогам. У даній роботі розглядаються принципи побудови, функції та технічні аспекти таких систем.

Підземні транспортні споруди характеризуються унікальними умовами експлуатації, серед яких:

- Відсутність природної вентиляції.
- Значні теплові та газові викиди (транспорт, обладнання, пасажиропотоки).

- Обмежений простір для розміщення інженерних мереж.

Підвищені вимоги до пожежної безпеки.

До основних типів підземних споруд належать:

- Метрополітени.
- Автомобільні тунелі.
- Залізничні тунелі.
- Підземні паркінги.
- Пішохідні переходи.

Кожен тип має свої особливості щодо мікроклімату та необхідної інженерної інфраструктури.

Система контролю мікроклімату метрополітену відстежує та підтримує такі параметри:

Температура повітря – впливає на комфорт людей і роботу обладнання.

Вологість – підвищена вологість спричиняє корозію та погіршує стан будівельних матеріалів.

Концентрація CO<sub>2</sub> – індикатор якості повітря.

Концентрації CO, NO<sub>x</sub>, CH<sub>4</sub> – особливо важливі в автомобільних та залізничних тунелях.

Пил і аерозолі – погіршують якість повітря та зношують обладнання.

Швидкість і напрямок повітряного потоку – важливі для вентиляції та евакуації диму.

На рис. 2.1 зображена функціональна схема системи контролю мікроклімату [31-33].

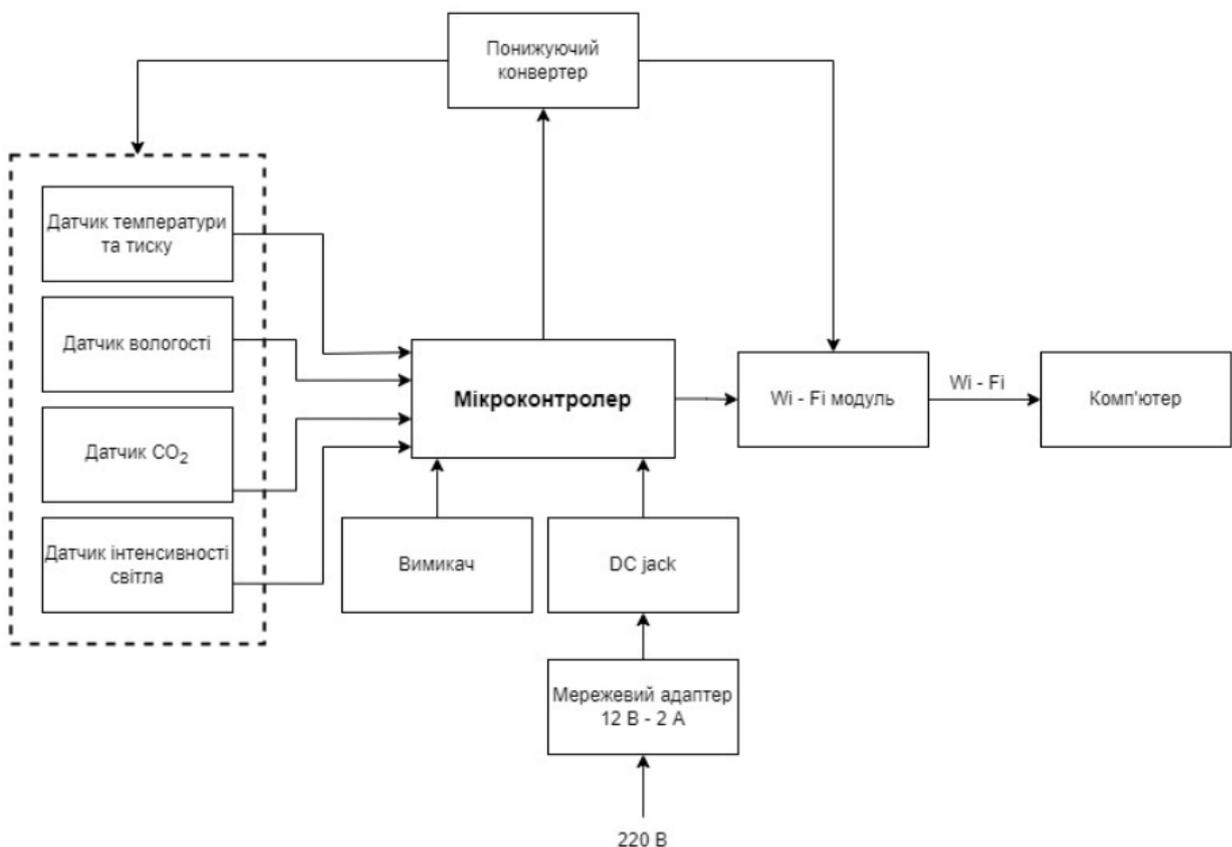


Рисунок 2.1 – Функціональна схема ІВС

Розглянемо принцип роботи системи:

1. Набір датчиків:

- Датчик температури та тиску — вимірює температуру повітря та атмосферний тиск у приміщенні;
- Датчик вологості — контролює рівень відносної вологості;
- Датчик CO<sub>2</sub> — визначає концентрацію вуглекислого газу в повітрі;
- Датчик інтенсивності світла — вимірює рівень освітленості в приміщенні.

Ці датчики формують комплексну картину мікроклімату та забезпечують точний моніторинг умов довкілля.

2. Мікроконтролер:

- слугує центральним елементом системи, який збирає дані з усіх датчиків;
- обробляє отримані значення та формує необхідні сигнали;
- виконує функції управління системою, реагуючи на зміни мікроклімату та забезпечуючи стабільну роботу пристроїв.

3. Понижуючий конвертер:

- є регульованим стабілізатором напруги;
- забезпечує зміну напруги в діапазоні 1,25–35 В для оптимального живлення всіх компонентів;
- захищає систему від перепадів напруги та підвищує її надійність.

4. Вимикач:

- дає можливість користувачу вмикати та вимикати систему в потрібний момент;
- забезпечує додатковий контроль над подачею живлення.

5. DC-jack:

- роз'єм для підключення зовнішнього джерела живлення;
- необхідний, оскільки мікроконтролер не має вбудованого роз'єму відповідного типу;
- забезпечує надійне і безпечне з'єднання.

#### 6. Мережевий адаптер 12 В, 2 А:

- подає електроживлення до системи;
- гарантує стабільну напругу та струм, необхідні для роботи електронних компонентів.

#### 7. Wi-Fi модуль:

- приймає оброблені дані від мікроконтролера;
- передає інформацію на комп'ютер, смартфон або інший кінцевий пристрій для подальшого моніторингу, збереження або аналізу.

Принцип роботи системи функціональної схеми можна узагальнити у п'ять етапів:

- Збір даних. Датчики фіксують параметри мікроклімату та передають інформацію на мікроконтролер.
- Обробка даних. Мікроконтролер аналізує отримані значення, визначає поточний стан середовища та формує відповідні сигнали для передачі або керування.
- Передача даних. Оброблена інформація надходить на Wi-Fi модуль, який відправляє її на зовнішній пристрій для відображення, збереження або аналізу.
- Енергопостачання. Мережевий адаптер забезпечує постійне живлення системи. Через DC-jack електроенергія надходить на мікроконтролер, а понижуючий конвертер регулює напругу для стабільної роботи всіх елементів.
- Керування системою. Вимикач дозволяє користувачу вручну запускати або вимикати систему за потреби.

## 2.2 Вибір елементної бази ІВС контролю параметрів мікроклімату в підземних транспортних спорудах

Мікроконтролер Arduino Nano. Arduino Nano – це компактна, універсальна та водночас потужна мікроконтролерна плата, створена на основі мікроконтролера ATmega328. Завдяки своїм малим габаритам і повноцінному

функціоналу вона стала однією з найпопулярніших платформ у середовищі розробників, студентів та інженерів.

Однією з головних переваг Arduino Nano є її компактність, що дозволяє легко інтегрувати плату в невеликі пристрої або використовувати в умовах обмеженого простору. Низька вартість, доступність компонентів та підтримка великої спільноти роблять її чудовим вибором для навчання й реалізації як простих, так і доволі складних проектів.

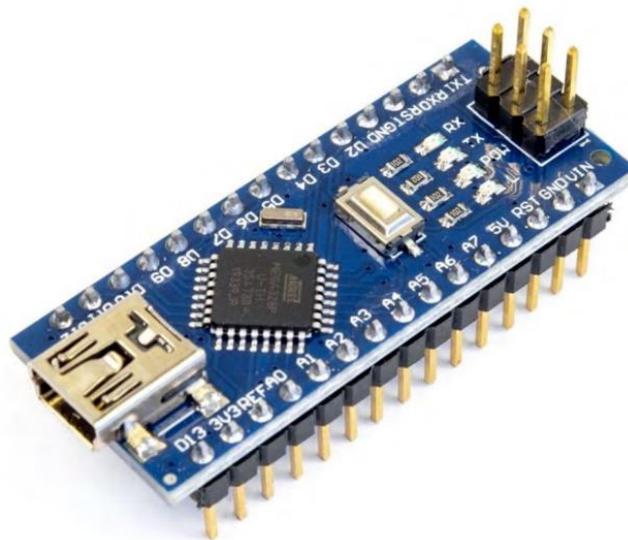


Рисунок 2.2 – Arduino Nano

Плата підтримує до 22 цифрових входів/виходів, кілька аналогових входів, апаратний PWM, а також інтерфейси I2C, SPI і UART, що забезпечує можливість з'єднання з різноманітними датчиками, модулями та виконавчими механізмами. Живлення може здійснюватися як через USB, так і через зовнішні джерела, що робить використання плати гнучким та зручним.

Arduino Nano широко застосовується у робототехніці, системах автоматизації, розумних пристроях, навчальних проектах та прототипуванні електронних систем. Простота програмування через середовище Arduino IDE дозволяє швидко створювати та змінювати прошивки, що особливо корисно під час експериментів та розробки нових пристроїв.

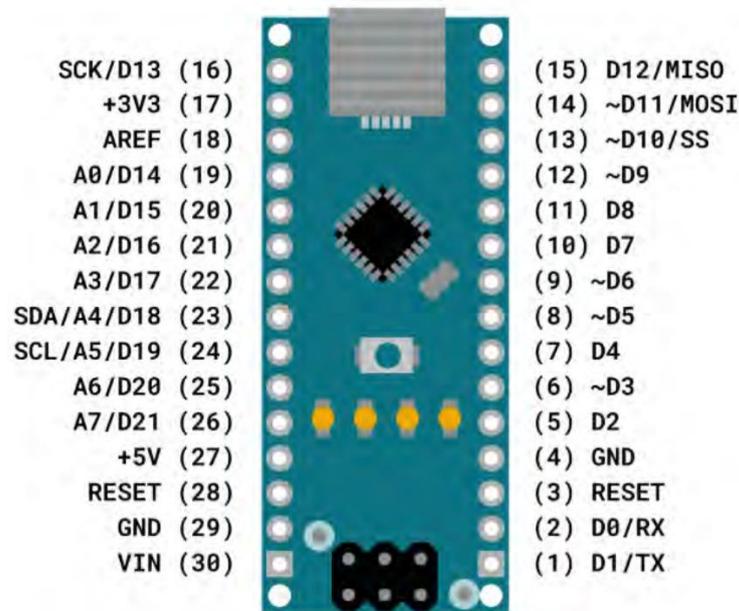


Рисунок 2.3 – Призначення портів мікроконтролера Arduino Nano

Завдяки поєднанню компактних розмірів, функціональності та легкості використання Arduino Nano є однією з найкращих платформ для створення інноваційних електронних рішень.

Температура: DS18B20. Датчик Dallas DS18B20 з повністю аналогічними параметрами як і DS18 S 20: діапазон вимірюваних температур від -55 до +125 °C, цифровий код, що зчитується з приладу, є прямим безпосереднім кодом вимірюваного значення температури і не потребує додаткових перетворень. Програмована користувачем роздільна здатність вбудованого АЦП може бути змінена в діапазоні від 9 до 12 розрядів вихідного коду. Абсолютна похибка перетворення менша за 0.5 °C в діапазоні контрольованих температур -10 до +85 °C. Максимальний час повного 12-розрядного перетворення ~750 мс (при роздільній здатності 12 розрядів). Для підключення потрібен резистор 4.7 кОм.

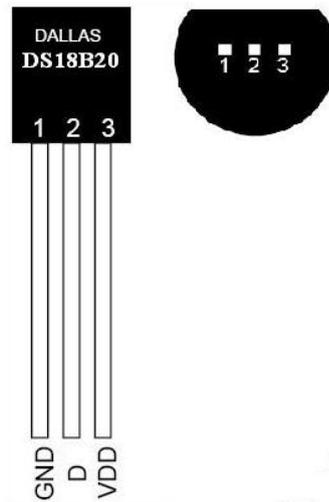


Рисунок 2.4 – Цифровий датчик температури DS18B20

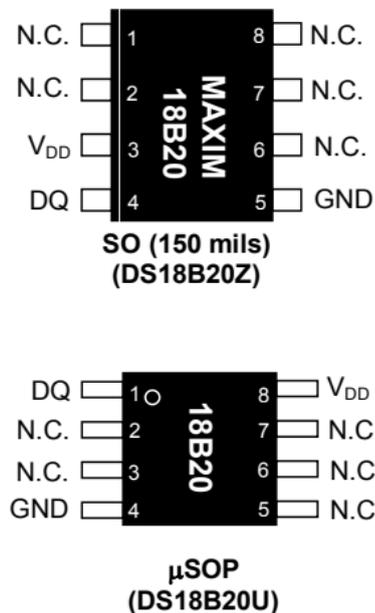


Рисунок 2.5 – Конфігурація контактів датчика DS18B20

Внутрішня енергонезалежна пам'ять температурних установок забезпечує запис довільних значень верхньої та нижньої межі установок. Крім того, мікросхема містить вбудований логічний механізм пріоритетної сигналізації в лінію факту виходу температури за один з обраних порогів. Вузол 1-Wire-інтерфейсу приладу організований таким чином, що існує теоретична можливість адресації необмеженої кількості таких пристроїв на однопровідній лінії.

Термометр має індивідуальний 64-розрядний реєстраційний номер (груповий код 028Н) та забезпечує можливість роботи без зовнішнього джерела живлення лише за рахунок паразитного живлення однопровідної лінії. Живлення пристрою через окремий зовнішній висновок проводиться напругою від 3.0В до 5.5В.

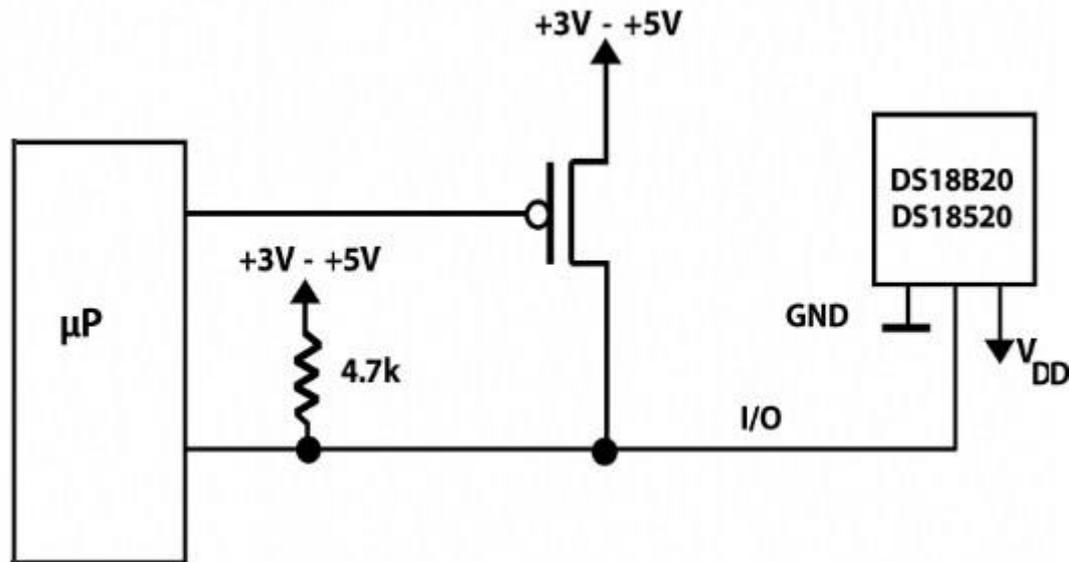


Рисунок 2.6 – Схема підключення датчика температури

Таблиця 2.1 – Порівняння датчиків DS18B20 та DS18S20:

	Датчик DS18S20	Датчик DS18B20
Маркування	DS1820	DS18B20
Корпус	TO-92	TO-92
Розрядність	9-біт	9-12біт
Час перетворення	750mS (max)	750mS (max)
Точність вимірювання ±0.5% в області температур	-10...+85°C	- 10...+85°C
Напруга живлення для точності вимірювання ±0.5%	3,0 – 5,5V	3,0 – 5,5V

Датчик для вимірювання вологості: Sensirion SHT31. Датчик вологості та температури Sensirion SHT31 — це високоточний цифровий сенсор з інтерфейсом I2C, здатний вимірювати відносну вологість у діапазоні 0–100% з точністю  $\pm 2\%$  та температуру від  $-40^{\circ}\text{C}$  до  $+125^{\circ}\text{C}$ . Завдяки простому підключенню та стабільним показникам він широко використовується в проєктах на базі мікроконтролерів, таких як Arduino та Raspberry Pi.



Рисунок 2.7 – SHT31 - Цифровий датчик вологості

Основні характеристики:

- Діапазон вимірювання вологості: 0–100% RH
- Точність вимірювання вологості:  $\pm 2\%$  RH
- Діапазон вимірювання температури:  $-40^{\circ}\text{C}$  ...  $+125^{\circ}\text{C}$
- Точність температури: до  $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$  у робочому діапазоні
- Інтерфейс: цифровий I2C
- Робоча напруга: 2.4–5.5 В

Додаткові особливості: вбудований АЦП, наявність калібрувальної пам'яті, низьке енергоспоживання, сумісність із SMD-монтажем.

CO<sub>2</sub>: Sensirion SCD30 (NDIR). SCD30 від Sensirion – це високоякісний недисперсійний інфрачервоний (NDIR) датчик CO<sub>2</sub>, здатний виявляти концентрацію газу від 400 до 10000 ppm з точністю  $\pm (30 \text{ ppm} + 3\%)$ . Для підвищення точності SCD30 має вбудований вимір температури та вологості, а

також команди для встановлення поточної висоти над рівнем моря. Для додаткової точності SCD30 також приймає показання тиску довкілля.

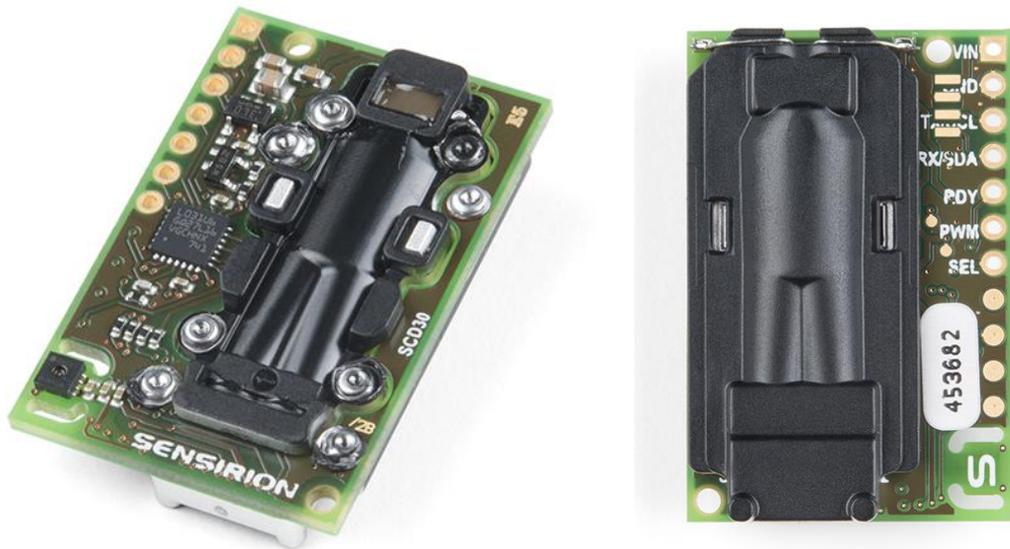


Рисунок 2.8 – Датчик CO<sub>2</sub>, температури та вологості SCD30 від Sparkfun

Датчик вологості та температури SCD30 також може автоматично виявлятися, скануватися, налаштовуватись та реєструватися за допомогою системи реєстратора даних OpenLog Artemis. При цьому не потрібне програмування, паяння чи налаштування.

SCD30 має автоматичну процедуру самокалібрування. Sensirion рекомендує чергувати кожні 7 днів безперервних показань з не менш як 1 годиною на день «свіжого повітря» для завершення самокалібрування.

Характеристики датчика:

- Напруга живлення: 3,3 В - 5,5 В
- Сенсорна технологія NDIR CO<sub>2</sub>
- Датчик температури та вологості: вбудований
- Двохканальне виявлення для чудової стабільності
- Розміри: 35 мм x 23 мм x 7 мм
- Діапазон вимірювання: 400 ppm - 10.000 ppm
- Точність вимірів: ± (30 ppm + 3%)
- Споживаний струм: 19 мА при 1 меас. на 2 с.

- Споживання енергії: 120 мДж за 1 виміру
- Повністю відкалібрований та лінеаризований
- Цифровий інтерфейс: UART чи I2C

Датчик для вимірювання CO: Alphasense CO-B4 (електрохімічний). Електрохімічний сенсор CO-B4 Alphasense призначений для вимірювання чадного газу CO в повітрі робочого середовища. Датчик CO-B4 серії B та діаметром 32mm є найкращим вибором для безпечного, якісного, високочутливого вимірювання чадного газу CO у складі стаціонарних газоаналізаторів. Перевірена технологія паливних елементів забезпечує необхідну чутливість, селективність та стабільність вимірів. 4-електродний газовий сенсор має відгук 30 секунд, стабільний вихідний сигнал, діапазон температур від  $-30^{\circ}\text{C}$  до  $+50^{\circ}\text{C}$ . Сильні рівні сигналу у поєднанні з низьким нульовим струмом дозволяють отримати роздільну здатність до  $< 10$  (ppb) та широкий робочий діапазон 0 - 1000 ppm.



Рисунок 2.9 – Сенсор CO-B4 вимірювання чадного газу CO

Особливості сенсора CO-B4 Alphasense:

- Час відгуку сенсора менше 15 секунд.
- Діапазон вимірювання датчика: 0 - 1000 ppm (Це шкала вимірювання дуже низьких концентрацій речовин, наприклад, газів (чадного газу CO, водню H<sub>2</sub>) або розчинених домішок у воді, часто використовується в газоаналізаторах і приладах контролю якості повітря, де 1000 ppm еквівалентно 0,1% або 1

проміле. Прилад може показувати, що концентрація CO у приміщенні знаходиться в межах від нуля до 1000 ppm, що є критичним рівнем здоров'я.)

- Чутливість/вихідний сигнал: 420 to 650 nA/ppm
- Час відгуку  $t_{90}$ : 30 sec.
- Температурний діапазон:  $-30^{\circ}\text{C}..+50^{\circ}\text{C}$
- Дрейф нуля менший - 100 ppb на рік.
- Середній термін служби сенсора – 3 роки.

Для вимірювання пилу оберемо високоточний датчик концентрації пилу Plantower PMS7003.

Лазерний модуль датчик PMS7003 використовує принцип лазерного розсіювання, який дозволяє отримати концентрацію зважених частинок повітря від 0,3...1,0 мкм, 1,0...2,5 мкм, 2,5...10 мкм. мікрон, використовуючи якісні лазери та світлочутливі компоненти, дані стабільні та надійні, вбудований вентилятор, цифровий вихід, висока інтеграція.



Рисунок 2.10 – Лазерний датчик пилу Plantower pms7003

Характеристики Plantower pms7003:

- Діапазон розмірів частинок: 0,3...1,0 мкм, 1,0...2,5 мкм, 2,5...10 мкм.
- Час відгуку: < 10 секунд
- Джерело живлення: 5В
- Робочий струм: 100 мА
- Струм у режимі очікування: 200 мкА
- Робоча температура:  $-10 \dots +60^{\circ}\text{C}$

- Габарити: 48 x 37 x 12 мм

Для кращого підключення датчик концентрації пилю Plantower PMS7003 використаємо адаптер-перетворювач.

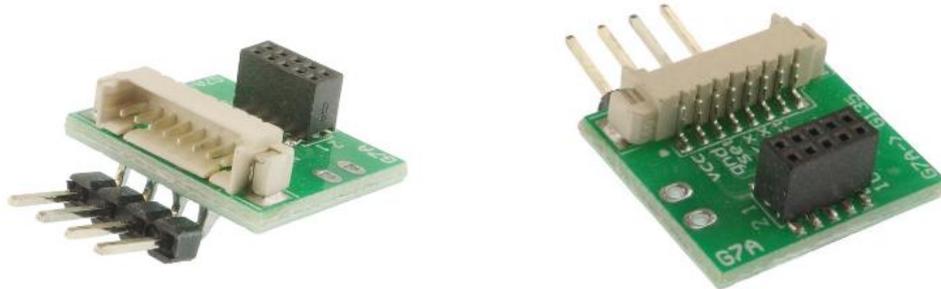


Рисунок 2.11 – Адаптер для датчика пилю Plantower PMS7003

Перетворювач дозволяє передавати сигнали з роз'єму датчика PMS7003 із щільним кроком 1,27 мм на стандартний штирьковий роз'єм (золоті контакти) з кроком 2,54 мм. Завдяки цьому модулю підключення датчика Plantower до різних плат розробки (таких як Arduino чи STM32) стає значно простішим. Крім того, адаптер оснащений роз'ємом JST з кроком 1,25 мм, який часто використовується у проєктах із PMS7003, а розташування та призначення вихідних сигналів позначено безпосередньо на платі.

Характеристики перетворювача:

- Адаптер для лазерного датчика пилю Plantower PMS7003.
- Полегшує підключення сенсора до макетних плат, модулів або стартових комплектів.
- На контактному роз'ємі доступні такі сигнали: VCC, GND, RX, TX.
- Передбачено місце для припаювання штирькового роз'єму для сигналів RESET і SET (роз'єм у комплект не входить).
- Маркування всіх сигналів нанесено на плату.
- Додатковий роз'єм JST з кроком 1,25 мм.
- Підходить до роз'єму датчика та не потребує додаткового кріплення.

- Для контролю диму та задимлення оберемо оптичний фотоелектричний датчик (Honeywell або аналог).

Оптичні фотоелектричні датчики Honeywell та їх аналоги (наприклад, від Siemens, Sick, Omron, Banner Engineering) використовуються для контролю полум'я (для пальників) типу IRD 1020.1, FSL 100, або для загальних завдань детектування (наприклад, волоконно-оптичні типу FE3-FB6-H) у промисловості, автоматизації та системах безпеки, працюючи в інфрачервоному (IR) та ультрафіолетовому (UV) спектрах. Аналоги пропонують схожі функції, а вибір залежить від типу палива, умов експлуатації (задимленість, забруднення вікна) та необхідної чутливості.

Типи та застосування датчиків Honeywell:

Датчики полум'я (Flame Detectors): Honeywell IRD 1020.1 BLUE: Інфрачервоний датчик для контролю горіння газових/комбінованих пальників, працює з автоматами керування.

Honeywell FSL 100 (UV/IR & IR3): Для рідких/забруднених вуглеводнів, менш чутливий до диму та забруднень вікна, виявляє полум'я від дерева, паперу, водню.

Волоконно-оптичні (Fiber Optic): Honeywell FE3-FB6-H: Використовують оптоволокну для передачі сигналу від точки виявлення до сенсора.

Аналоги та альтернативи (виробники):

- Siemens: Також пропонує інфрачервоні та ультрафіолетові датчики полум'я (наприклад, серії QRA).

- Sick: Широкий спектр фотоелектричних та датчиків полум'я.

- Omron: Виробляє багато універсальних фотоелектричних датчиків для автоматизації.

- Banner Engineering: Відомі своїми датчиками для промислової автоматизації.



Рисунок 2.12 – Оптиволоконний фотоелектричний датчик

Більше детальніше розглянемо характеристики фотодатчика Honeywell IRD 1020.1 BLUE (синій, осьовий) зі стандартною чутливістю призначений для роботи з автоматами керування горінням Satronic–Honeywell. Він забезпечує контроль полум'я у газових та комбінованих пальниках.

ІЧ-датчик полум'я Honeywell IRD 1020.1 BLUE (синій осьовий) сумісний з топковими автоматами Satronic–Honeywell таких типів: DKG 972, DLG 974, 976, DMG 970–973, SG 113/133/513, TFI 812.2, MMI 810/812/815/816/962, TMG 740-2/740-3, SGU 930/930i.

Конструкція датчика забезпечує осьову видимість полум'я. Інфрачервоний датчик полум'я для газових і комбінованих пальників Технічні характеристики Honeywell IRD 1020.1 (Art. Nr. 16532):

- Тип: інфрачервоний датчик полум'я Satronic IRD 1020.1
- Спосіб вимірювання: фронтальний
- Номінальний вхідний струм: приблизно 4 мА
- Спектральний діапазон: 800–1100 нм
- Діапазон регулювання чутливості: приблизно 1:20 (26 дБ)
- Клас чутливості: стандартний
- Стійкий до перешкод, не реагує на іскру підпалу



Рисунок 2.13 – Датчик Honeywell IRD1020.1

Анемометр: ультразвуковий або крильчастий (Gill/Testo). Анемометр – це прилад для вимірювання вітру, швидкості вітру та повітряного потоку, а також прилад яким вимірюють напрямок руху повітря, рух газів, рідин, якості повітря та температуру.

Анемометри частіше застосовують на метеостанціях, але також використовують скрізь, де необхідно виміряти швидкість вітру. Адже зміни таких параметрів як швидкість і напрям вітру вказують нам на зміни або погіршення умов погоди, такі як шторм, гроза або інші небезпечні умови, про які необхідно знати морякам, пілотам і звичайної людини. У промисловості для перевірки вентиляції, систем кондиціонування, будівництва та сільського господарства.

В асортименті виробників анемометрів представлені два принципово різних напрямки, що розрізняються конструктивно: механічний та електронний (цифровий анемометр).

Механічний тип анемометрів:

1) анемометр чашковий - таку назву прилад отримав через лопаті, які схожі на чашки. При попаданні на лопаті вітру чашки обертаються і за їх швидкістю визначають швидкість вітру. Але прилад може вимірювати швидкість вітру лише в одній площині, яка перпендикулярна до обертання осі.

2) анемометр (крильчатий) – з'явилися в результаті більш удосконаленого виду чашечним анемометрам, відмінність їх у деталі, яка зроблена у формі вентилятора, який вловлює швидкість вітру всередині даного анемометра. Використовують зазвичай такі анемометри в трубопроводах і вентиляційних системах визначення не тільки швидкості вітру, а й напрям вітру.

Електронний (анемометр цифровий) тип:

1) тепловий анемометр- менш поширений, але вважається анемометром, який показує більш точну інформацію, і вимірює швидкість повільних потоків. Працює за допомогою електронної схеми, до якої підключається дріт термодатчика. Широко використовується у всіх сучасних автомобілях як датчик масової витрати повітря.

2) анемометр ультразвуковий-вимірює швидкість звуку, яка змінюється від напрямку вітру. Якщо, наприклад, звук рухається на зустріч вітру, то швидкість вітру буде нижче. А якщо звук рухається з вітром в одному напрямку, то його швидкість буде вищою. У такий спосіб вимірюється час отримання ультразвукового імпульсу, і при підключенні до комп'ютера можна опрацювати отримані дані.

Переваги даного приладу в тому, що з його допомогою можна визначити комфортні умови в приміщенні, офісі, на заводах, де маленьке навіть відхилення загрожує серйозними наслідками для людини.

Ультразвукові анемометри вимірюють швидкість вітру в горизонтальному напрямку, напрямок вітру, а також температуру повітря ультразвуковим методом.

У крильчастих анемометрах основним вимірювальним елементом є вітрове колесо (пропелер), яке може бути розміщене всередині корпусу приладу або винесене на окремий модуль. Конструкція пропелера зазвичай доповнена захисним кільцем, що оберігає його від механічних пошкоджень.

Під час роботи прилад вимірює швидкість повітряного потоку: рух повітря обертає крильчатку, утворюючи імпульси, які надходять до мікросхеми та перетворюються в цифрове значення, що відображається на дисплеї.

#### Застосування крильчастих анемометрів

Вимірювання швидкості повітряного потоку важливе не лише для метеорології. Крильчасті анемометри широко використовуються:

- на підприємствах, оснащених системами вентиляції та кондиціонування повітря;
- у сільському господарстві — для контролю швидкості вітру під час обприскування та зрошення полів;
- при монтажі повітропроводів, витяжних систем і димоходів, де необхідно точно оцінювати напрям і швидкість переміщення повітря;
- в автомобільному сервісі — для діагностики та налаштування систем охолодження, обігріву й вентиляції.

Датчик інтенсивності світла. Фоторезистор — це чутливий елемент, виготовлений із напівпровідникового матеріалу, опір якого змінюється залежно від рівня освітленості. Принцип його роботи полягає в тому, що при збільшенні інтенсивності світла електропровідність напівпровідника зростає, а опір відповідно зменшується. У темряві ж фоторезистор має високий опір, що робить його ефективним елементом для вимірювання та контролю освітленості.



Рисунок 2.14 – LDR (Light Dependent Resistor) – датчик інтенсивності світла.

На зображенні представлено фоторезистор, чутливий елемент, опір якого змінюється залежно від рівня освітленості. LDR використовується для перетворення змін інтенсивності світла в електричний сигнал, що робить його незамінним у системах автоматичного керування освітленням, робототехніці, розумних пристроях та інших електронних застосуваннях.

Під час виготовлення фоторезистору можна надавати майже будь-яку необхідну форму та розмір, а також змінювати площу чутливої поверхні відповідно до вимог конкретного застосування. Завдяки такій гнучкості конструкції фоторезистори легко інтегруються у широкий спектр електронних пристроїв.

Фоторезистори активно використовуються в різних галузях промисловості та побутовій електроніці. Їх можна зустріти в автоматичних освітлювальних системах, іграшках, вимірювальній техніці, охоронних датчиках, сигналізаціях, фото- та відеокамерах, а також у багатьох інших пристроях, де необхідно реагувати на зміни рівня світла.

Фоторезистор (LDR) має низку технічних характеристик, які визначають його чутливість, швидкість реакції та придатність до різних застосувань. Основні параметри включають:

Діапазон опору: у темряві опір фоторезистора може становити від кількох сотень кОм до кількох МОм, тоді як при яскравому освітленні він різко зменшується — до десятків або навіть одиниць кОм. Такий широкий діапазон дозволяє точно реєструвати зміни рівня світла.

Спектральна чутливість: більшість LDR чутливі до світла з довжиною хвилі від 400 до 700 нм, тобто у видимому діапазоні. Максимальна чутливість зазвичай припадає на зелену або жовту частину спектра.

Час відгуку: фоторезистори реагують на зміну освітленості не миттєво. Час відгуку може становити від декількох мілісекунд до сотень мілісекунд. Це слід враховувати у системах, де потрібні швидкі зміни сигналу.

Максимальна робоча напруга: залежно від моделі, робоча напруга може становити 50–250 В, але у більшості електронних схем LDR використовуються в низьковольтних колах (3.3–5 В).

Робоча температура: типовий діапазон роботи становить від  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $+70\text{ }^{\circ}\text{C}$ , що дозволяє використовувати датчик у різних умовах.

Розмір та матеріал: чутливий елемент виготовляється з сульфїду кадмію (CdS) або селенїду кадмію (CdSe), що забезпечує хорошу реакцію на природне та штучне освітлення. Розміри можуть варіюватися залежно від моделі.

Такі технічні характеристики роблять фоторезистор ефективним і доступним компонентом для використання в даній системі контролю.

Понижуючий конвертер. LM2596 – це регульований імпульсний понижуючий стабілізатор постійної напруги, який забезпечує ефективне перетворення високої вхідної напруги у нижчу стабілізовану вихідну. Завдяки імпульсному принципу роботи він має високий коефіцієнт корисної дії (ККД), що значно зменшує тепловиділення в порівнянні з традиційними лінійними стабілізаторами. Такий тип перетворювача є особливо корисним у системах, де важлива енергоефективність та стабільне живлення різноманітних електронних компонентів.



Рисунок 2.15 – Понижуючий конвертер LM2596

LM2596 може застосовуватися у широкому спектрі пристроїв — від побутових електронних модулів до промислових контролерів. Регулювання вихідної напруги здійснюється шляхом зміни резистивного дільника на вході

зворотного зв'язку, зазвичай за допомогою змінного резистора (потенціометра). Це дозволяє точно встановити необхідний рівень вихідної напруги для підключених модулів.

Однією з ключових переваг LM2596 є його здатність працювати в широкому діапазоні вхідних напруг, що робить модуль універсальним у випадках, коли джерело живлення може змінюватися або бути нестабільним. У практичних проєктах цей понижуючий конвертер часто використовується для живлення мікроконтролерів, сенсорів та модулів зв'язку. Зокрема, датчики та модуль ESP8266 отримують перетворену та стабільну напругу саме за допомогою LM2596

Основні технічні характеристики LM2596:

- Тип стабілізатора: імпульсний понижуючий (buck-конвертер).
- Вхідна напруга: зазвичай від 4,5 до 40 В (залежно від версії).
- Регульована вихідна напруга: від 1,25 до 35 В.
- Максимальний вихідний струм: до 3 А (рекомендовано 2 А для стабільної роботи).
- ККД: до 90 % залежно від умов роботи.
- Частота перемикання: приблизно 150 кГц.
- Захист: від перегріву, перевантаження та короткого замикання.
- Компактність: доступний у вигляді модулів з гвинтовими клемми або паяльними контактами.

Wi-Fi модуль. ESP-01 — це компактний WiFi-модуль, побудований на основі популярного та продуктивного чіпсета ESP8266EX, який поєднує в собі функції мікроконтролера та модуля бездротового зв'язку. На платі розміщено 2 МБ Flash-пам'яті, мікросхема ESP8266EX, кварцовий резонатор, два індикаторні світлодіоди, а також компактна друкована антена у вигляді «змійки», яка забезпечує стабільний прийом WiFi-сигналу. Flash-пам'ять використовується для збереження прошивки, яка автоматично завантажується в чіп після кожного увімкнення живлення (рис. 16).

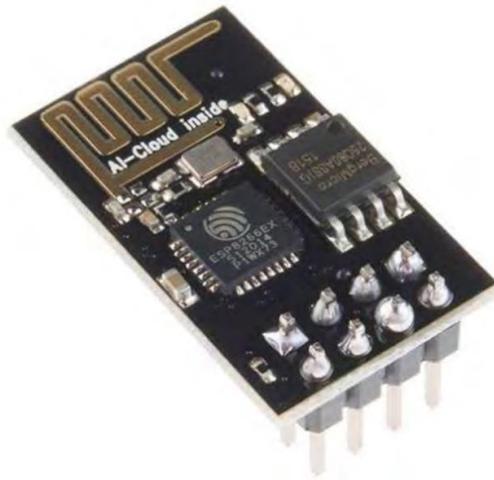


Рисунок 2.16 – Wi-Fi модуль ESP8266

ESP-01 вирізняється високим рівнем інтеграції, що дозволяє мінімізувати необхідність у додаткових зовнішніх компонентах. Крім того, модуль характеризується низьким енергоспоживанням, підтримуючи режими енергозбереження, що робить його ефективним рішенням для автономних IoT-пристроїв.

У даному проєкті ESP-01 використовується як бездротовий передавач для передачі даних, зчитаних із датчиків, на персональний комп'ютер. Обмін даними між ESP-модулем і комп'ютером або мікроконтролером здійснюється через інтерфейс UART із застосуванням набору AT-команд, що дозволяє легко керувати підключенням до WiFi-мережі, встановлювати з'єднання та передавати дані.

### 2.3 Алгоритм роботи ІВС контролю параметрів мікроклімату в підземних транспортних спорудах

Алгоритм роботи приладу — це впорядкована та логічно структурована послідовність кроків або дій, які виконує пристрій для досягнення визначеної мети чи розв'язання конкретного завдання. Іншими словами, це детальний опис того, яким чином пристрій реагує на вхідні сигнали, як аналізує та обробляє інформацію, а також які операції здійснює для отримання кінцевого результату.

У процесі виконання алгоритму враховуються особливості роботи окремих модулів і сенсорів, типи отримуваних даних, умови навколишнього середовища та необхідні обчислення. Алгоритм визначає логіку взаємодії між апаратними компонентами системи, програмним забезпеченням та користувачем [34-37].

Розроблений мною проєкт — це вимірювальна система контролю параметрів мікроклімату в підземних транспортних спорудах, зокрема в умовах метрополітену. Така система призначена для безперервного моніторингу ключових показників, що впливають на комфорт і безпеку пасажирів: температури повітря, відносної вологості, концентрації шкідливих газів, рівня запиленості та інших важливих параметрів.

Алгоритм роботи проєкту можна узагальнити так:

Зчитування даних сенсорами. Кожен датчик отримує інформацію з навколишнього середовища та передає її на обробку контролеру.

Первинна фільтрація та нормалізація інформації. Система усуває шум, перевіряє коректність показників і приводить дані до потрібного формату.

Обробка та аналіз. Контролер порівнює отримані параметри з допустимими значеннями, визначає наявність відхилень та виявляє потенційно небезпечні ситуації.

Збереження інформації. Усі дані фіксуються у внутрішній пам'яті або передаються на центральний сервер чи диспетчерський пункт.

Виведення результатів. Інформація відображається на екрані, передається через мережеві інтерфейси або надсилається як попереджувальні сигнали.

Реакція системи. У разі перевищення критичних меж система може автоматично подати сигнал тривоги, повідомити операторів або активувати додаткові механізми вентиляції чи безпеки.

Таким чином, алгоритм роботи приладу забезпечує точну, надійну та своєчасну оцінку стану мікроклімату в підземних умовах, що є важливим для

ефективного функціонування метрополітену та підвищення рівня безпеки пасажирів і працівників.

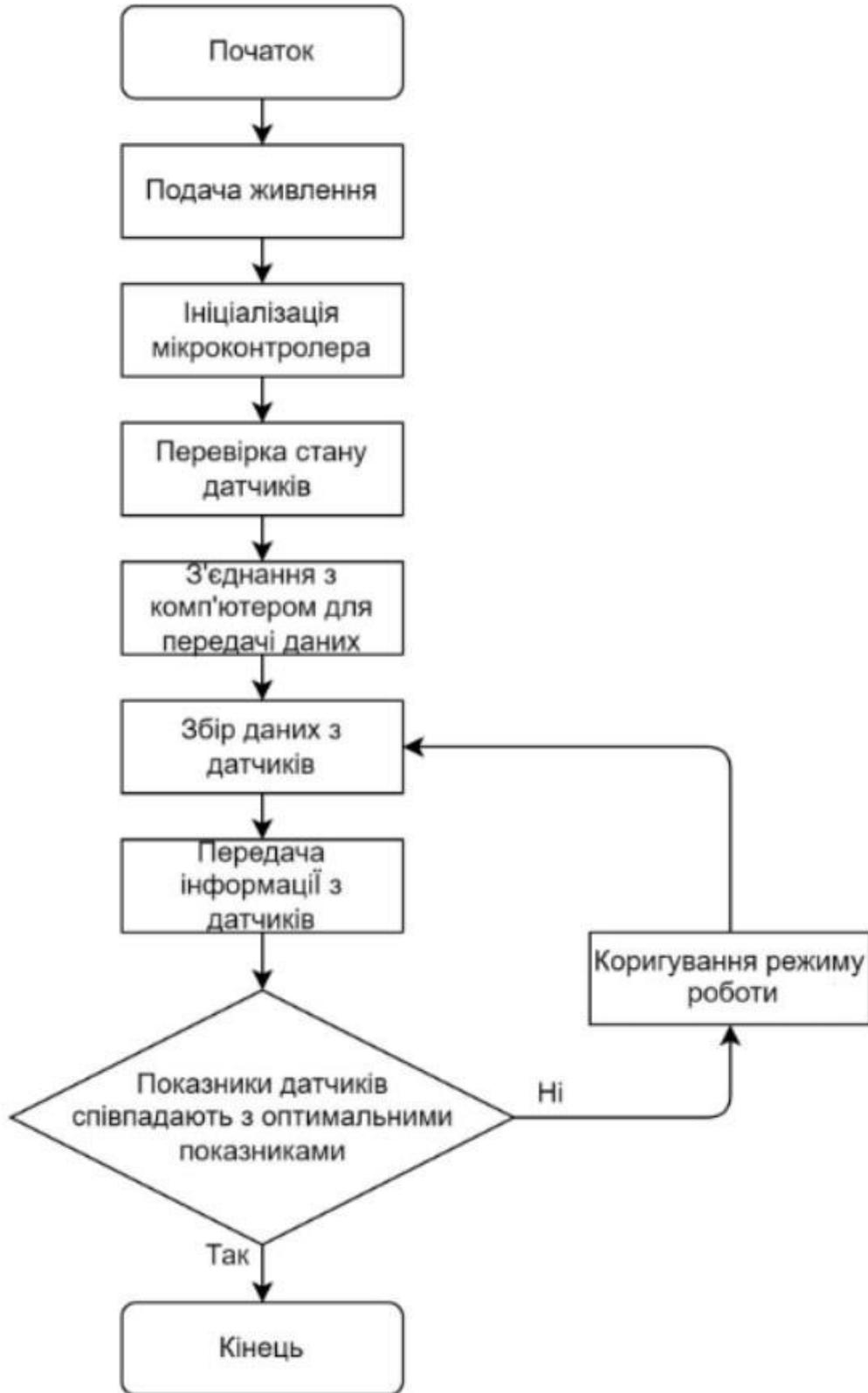


Рисунок 2.17 – Блок схема алгоритму роботи ІВС

Система контролю параметрів мікроклімату працює наступним чином. Після увімкнення контролера ініціалізуються всі модулі та датчики, після чого починається цикл періодичного зчитування параметрів навколишнього середовища. Дані з датчиків знімаються в такій послідовності: температура, інтенсивність світла, тиск, вологість та концентрація вуглекислого газу. Така послідовність дає змогу оптимізувати час опитування сенсорів і забезпечити стабільність отримуваних вимірювань.

Мікроконтролер Arduino Nano отримує сигнали з усіх під'єднаних датчиків, виконує їх первинну обробку (фільтрацію шумів, перевірку коректності значень, перетворення даних у необхідні одиниці вимірювання) та формує пакет інформації для передавання. Після цього оброблені дані надсилаються до Wi-Fi модуля ESP8266, який, у свою чергу, здійснює передачу параметрів мікроклімату на комп'ютер або сервер за допомогою бездротового з'єднання Wi-Fi.

Якщо показники датчиків відповідають оптимальним значенням мікроклімату, система переходить у режим очікування та повторює процедуру вимірювання через 30 секунд. Це дозволяє знизити навантаження на пристрій і забезпечити ефективне використання енергоресурсів.

Якщо ж отримані дані виходять за межі допустимих значень, система переходить у режим корекції. У цьому режимі пристрій може виконувати такі дії:

- 1) надсилати попереджувальні повідомлення на комп'ютер або мобільний пристрій оператора;
- 2) активувати додаткове обладнання (наприклад, вентиляційні системи чи сигнальні індикатори);
- 3) збільшувати частоту вимірювань для детальнішого моніторингу ситуації;
- 4) фіксувати аварійні значення у журналі подій для подальшого аналізу.

Таким чином, пристрій забезпечує безперервний контроль параметрів мікроклімату та оперативно реагує на відхилення, що є важливим для

підтримання безпечних умов у підземних транспортних спорудах, таких як метро.

## 2.4 Висновки до розділу

У другому розділі магістерської кваліфікаційної роботи виконано апаратну та алгоритмічну розробку інформаційно-вимірювальної системи контролю параметрів мікроклімату в підземних транспортних спорудах. Проведено системний аналіз умов експлуатації таких об'єктів, що характеризуються обмеженим повітрообміном, підвищеним рівнем забруднення, вологістю та тепловими навантаженнями, а також підвищеними вимогами до безпеки та надійності.

Розроблено функціональну схему ІВС, яка забезпечує комплексний моніторинг основних параметрів мікроклімату, зокрема температури, відносної вологості, концентрацій CO<sub>2</sub>, CO, рівня запиленості, освітленості та швидкості повітряного потоку. Обґрунтовано структурну організацію системи, визначено призначення та взаємодію її основних блоків: сенсорного рівня, мікроконтролерного модуля, системи живлення та бездротового каналу передавання даних.

Виконано обґрунтований вибір елементної бази системи. Як центральний керувальний елемент обрано мікроконтролер Arduino Nano, який поєднує компактність, достатню обчислювальну потужність і широку апаратну сумісність із сенсорами. Для вимірювання параметрів мікроклімату використано сучасні високоточні сенсори: DS18B20 для контролю температури, SHT31 для вологості, SCD30 на основі NDIR-технології для вимірювання концентрації CO<sub>2</sub>, електрохімічний сенсор Alphasense CO-B4 для контролю чадного газу, лазерний датчик пилу PMS7003, а також фотоелектричні та оптичні сенсори для контролю диму й освітленості. Такий набір сенсорів забезпечує необхідну точність, стабільність та швидкодію системи.

Розглянуто та обґрунтовано використання допоміжних апаратних модулів, зокрема понижуючого імпульсного перетворювача LM2596 для стабілізації живлення та Wi-Fi модуля ESP8266 для організації бездротового передавання даних. Це дозволяє підвищити енергоефективність системи, спростити її інтеграцію у сучасні інформаційні мережі та забезпечити віддалений моніторинг параметрів мікроклімату.

Розроблено алгоритм роботи інформаційно-вимірювальної системи, який передбачає ініціалізацію апаратних модулів, періодичне зчитування даних із сенсорів, первинну фільтрацію та нормалізацію вимірювальної інформації, аналіз отриманих значень і передавання результатів користувачу або на сервер. Алгоритм забезпечує адаптивну реакцію системи на відхилення параметрів від допустимих меж, що дає змогу оперативно виявляти потенційно небезпечні ситуації та підвищувати рівень безпеки в підземних транспортних спорудах.

Таким чином, сформовано завершену апаратно-алгоритмічну основу інформаційно-вимірювальної системи контролю мікроклімату, яка відповідає сучасним технічним вимогам, є масштабованою та придатною для практичного впровадження в умовах метрополітену та інших підземних транспортних об'єктів.

### **3 МЕТРОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТА АДАПТАЦІЯ ДО РЕАЛЬНИХ УМОВ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ІВС КОНТРОЛЮ ПАРАМЕТРІВ МІКРОКЛІМАТУ В ПІДЗЕМНИХ ТРАНСПОРТНИХ СПОРУДАХ**

3.1 Розрахунок необхідного мікроклімату в підземних транспортних спорудах (на прикладі станції «Театральна» Вінницького метрополітену)

Для виконання інженерних розрахунків параметрів мікроклімату проєктованої станції «Театральна» Вінницького метрополітену використано репрезентативні вхідні дані, отримані на основі експлуатаційних характеристик діючої станції глибокого закладення «Арсенальна» Київського метрополітену.

Вибір станції «Арсенальна» як базового аналога зумовлений її значною глибиною залягання, інтенсивним пасажиропотоком, тривалим режимом роботи та складними тепловологісними умовами, що дозволяє застосувати отримані параметри як консервативні (граничні) вхідні умови для проєктування нової підземної транспортної споруди.

Таким чином, геометричні, теплові та експлуатаційні характеристики станції «Арсенальна» приймаються як вхідні дані розрахункової моделі станції «Театральна», з метою забезпечення достатнього запасу по тепловому навантаженню, вентиляційній продуктивності та стабільності мікроклімату.

Зокрема, для розрахунків прийнято такі вхідні параметри:

- глибина закладення – 105,5 м;
- довжина платформи – 100,0 м;
- ширина платформи – 19,7 м;
- висота підплатформного простору – 6,0 м;
- форма платформи – пряма;
- кількість платформ – 1;
- режим роботи станції – з 05:38 до 00:10;
- пікова щільність пасажиропотоку – до 1,5 ос/м<sup>2</sup>.

Зазначені параметри визначають об'єм повітряного простору, інтенсивність теплових і вологісних надходжень, а також вимоги до систем вентиляції та кондиціонування проектованої станції «Театральна».

Прийняття теплових навантажень від пасажирів, систем освітлення, допоміжного електротехнічного обладнання та руху поїздів виконано на основі типових нормативних значень, характерних для станцій метрополітену глибокого закладення. Такий підхід дозволяє отримати узагальнену, але фізично обґрунтовану модель теплового балансу, придатну для попереднього проектування та аналізу ефективності систем забезпечення мікроклімату.

Оптимальні параметри відносної вологості для проектованої станції «Театральна» прийнято в діапазоні 40–60 % RH, що відповідає санітарно-гігієнічним вимогам до підземних транспортних споруд та забезпечує комфортні умови перебування пасажирів і персоналу, а також збереження інженерних конструкцій і обладнання.

Отже, використання параметрів станції «Арсенальна» як вхідних даних дозволяє адаптувати розрахункову модель до умов проектування Вінницького метрополітену, забезпечуючи технічно обґрунтований і консервативний підхід до формування вимог до систем контролю та регулювання мікроклімату станції «Театральна».

На рис.3.1 ілюструються джерела тепла і їхній внесок у сумарне навантаження.

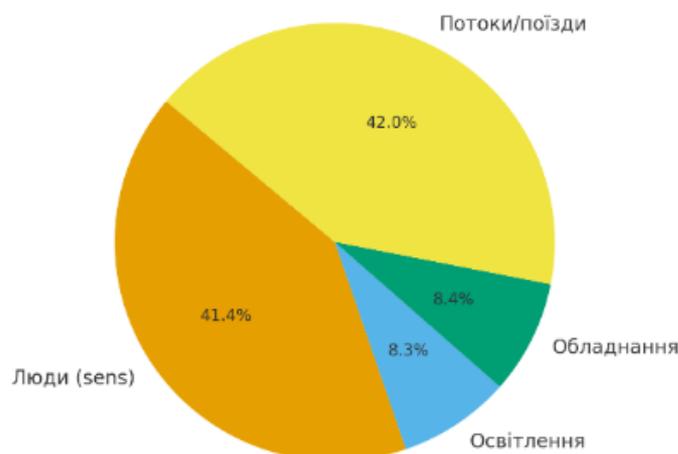


Рисунок 3.1 – Діаграма основних компонентів виділення теплових потоків

На рис. 3.2 демонстровано графічне зображення кількості необхідного повітря для ефективного видалення тепла, що є критичним для проектування систем кондиціонування та вентиляції.

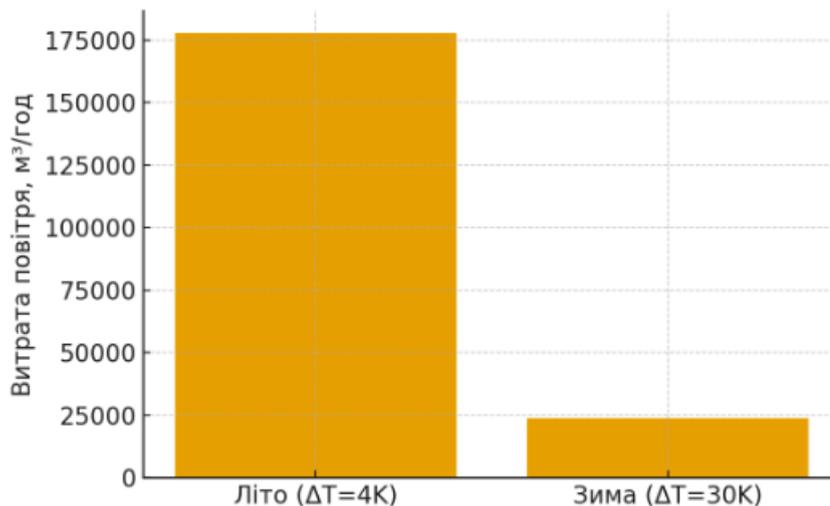


Рисунок 3.2 – Графічне зображення к-сті необхідного повітря для видалення тепла

А рис. 3.3 відображає графік зміни динаміки CO<sub>2</sub> протягом години при змінному пасажиропотоці, що дає змогу оцінити вплив людського фактора на якість повітря та потребу у вентиляції.

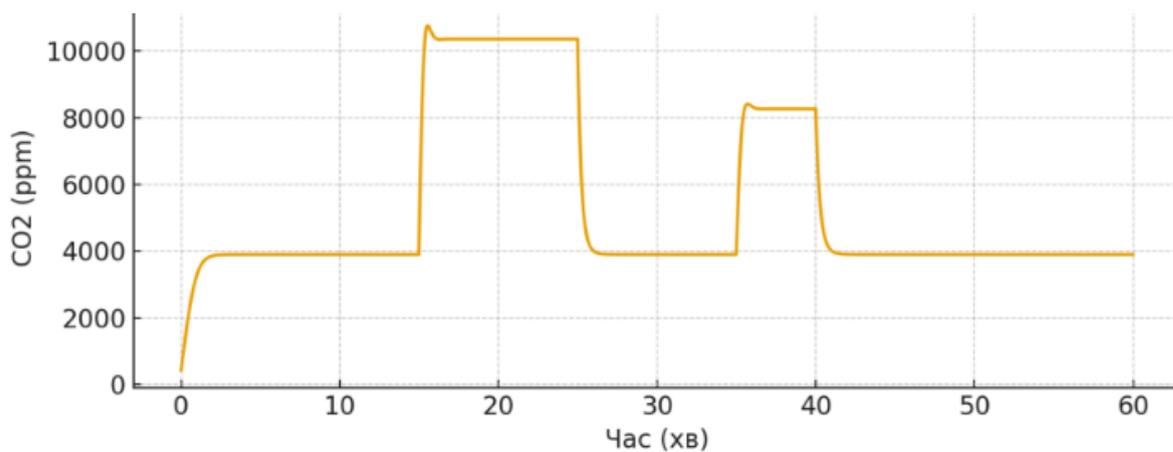


Рисунок 3.3 – Графік зміни динаміки CO<sub>2</sub> протягом години при змінному пасажиропотоці

Рис. 3.4 показує залежність швидкості вентилятора від концентрації CO, що дозволяє оцінити, як автоматичне регулювання швидкості реагує на зміну забруднення повітря.

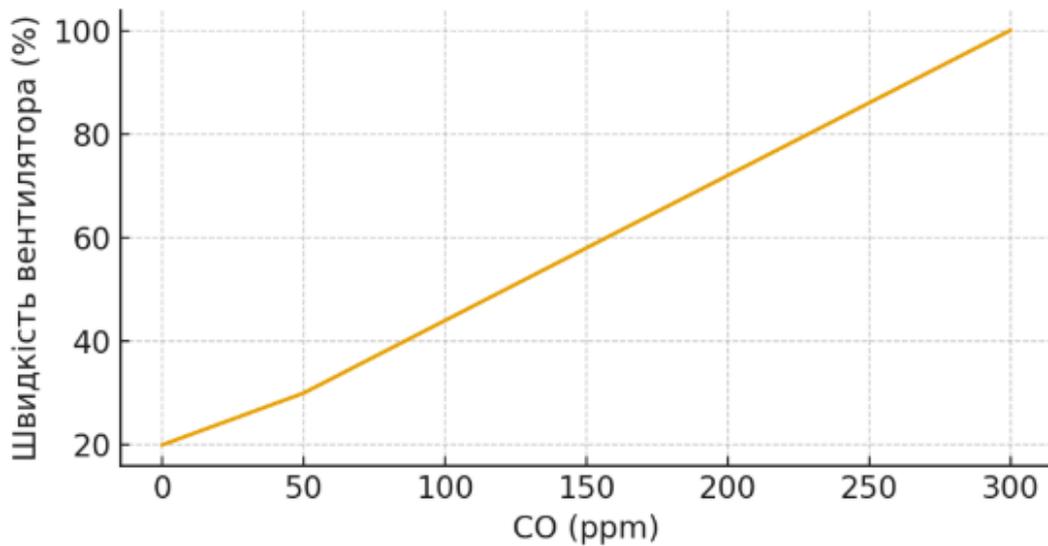


Рисунок 3.5 – Графік залежність швидкості вентилятора від концентрації CO

На рис. 3.6 демонстровано криву споживаної потужності вентилятора від відсотка швидкості, що дає змогу оцінити енергоефективність вентилятора при різних режимах роботи.

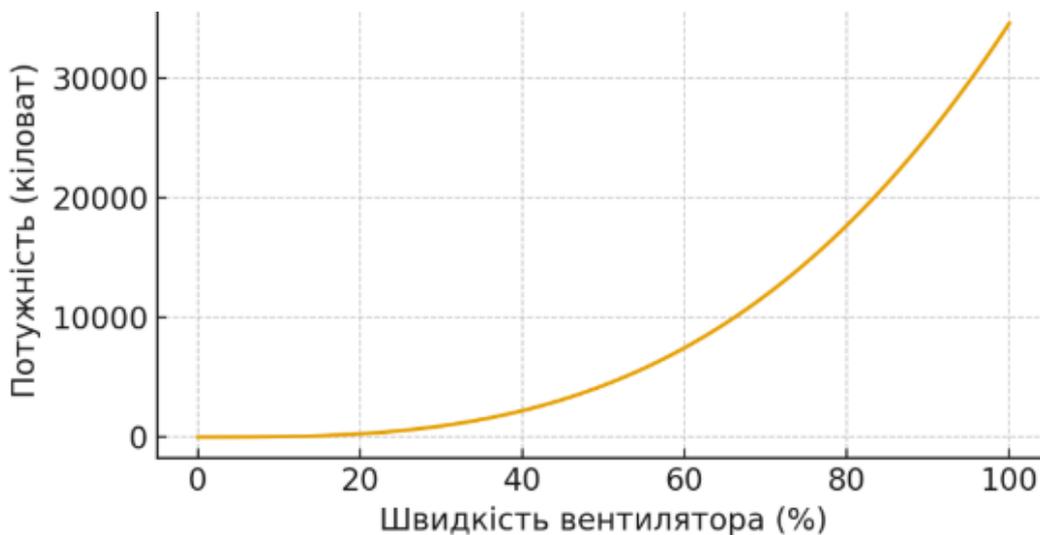


Рисунок 3.6 – Крива споживаної потужності вентилятора від відсотка швидкості вентилятора

Дані графіки дозволяють зв'язати параметри повітряного середовища та роботу обладнання, забезпечуючи наочне відображення впливу регулювання вентиляції на енергоспоживання і якість повітря.

Отже, проведено розрахунок необхідного мікроклімату для станції метро «Арсенальна», визначено обсяг повітря та теплові навантаження, що забезпечують підтримку комфортної температури та вологості. Розрахунки показали, що для охолодження платформи до 26 °С при літніх зовнішніх умовах необхідна охолоджувальна потужність близько 16 кВт, яку можна забезпечити за допомогою декількох побутових спліт-систем.

### 3.2 Метрологічне забезпечення ІВС контролю параметрів мікроклімату в підземних транспортних спорудах

Досліджувальна система контролю мікроклімату є багатоканальною інформаційно-вимірювальною системою (ІВС) [38-41], у якій кожен канал можна подати у вигляді послідовності перетворень:

$$X_i(t) \xrightarrow{\text{сенсор}} S_i(t) \xrightarrow{\text{АЦП}} D_i(t) \xrightarrow{\text{обробка}} Y_i(t) \quad (3.1)$$

де:  $X_i(t)$  – фізична величина (температура, вологість, концентрація газу тощо);  $S_i(t)$  – електричний сигнал сенсора;  $D_i(t)$  – цифровий код АЦП мікроконтролера Arduino Nano;  $Y_i(t)$  – виміряне та оброблене значення параметра.



Рисунок 3.7 – Узагальнена схема каналу вимірювання (Т, RH, CO<sub>2</sub>, CO, PM, LDR)

де: Д – Датчик (температури повітря, вологості повітря, атмосферного тиску, запиленості повітря); НП – нормуючий пристрій; АЦП – аналогово-цифровий перетворювач; МК – мікроконтролер;

Рівняння виміру температури, згідно рисунку 3.7:

$$N_{x1} = U_{\text{вх}} \cdot K_t \cdot K_{\text{НП}} \cdot K_{\text{АЦП}}, \quad (3.2)$$

де  $U_{\text{вх}}$  – вхідна напруга;  $K_t$  – коефіцієнт перетворення датчика температури;  $K_{\text{НП}}$  – коефіцієнт перетворення нормуючого пристрою;  $K_{\text{АЦП}}$  – коефіцієнт перетворення АЦП.

Рівняння виміру вологості:

$$N_{x1} = U_{\text{вх}} \cdot K_{RH} \cdot K_{\text{НП}} \cdot K_{\text{АЦП}}, \quad (3.3)$$

де  $U_{\text{вх}}$  – вхідна напруга;  $K_{RH}$  – коефіцієнт перетворення датчика вологості;  $K_{\text{НП}}$  – коефіцієнт перетворення нормуючого пристрою;  $K_{\text{АЦП}}$  – коефіцієнт перетворення АЦП.

Рівняння виміру освітленості (LDR):

$$N_{x1} = U_{\text{вх}} \cdot K_{LDR} \cdot K_{\text{НП}} \cdot K_{\text{АЦП}}, \quad (3.4)$$

де:  $U_{\text{вх}}$  – вхідна напруга;  $K_{LDR}$  – коефіцієнт перетворення датчика освітленості (фоторезистора);  $K_{\text{НП}}$  – коефіцієнт перетворення нормуючого пристрою;  $K_{\text{АЦП}}$  – коефіцієнт перетворення АЦП.

Рівняння виміру запиленості повітря:

$$N_{x1} = U_{\text{вх}} \cdot K_{\text{PM}} \cdot K_{\text{НП}} \cdot K_{\text{АЦП}}, \quad (3.5)$$

де:  $U_{вх}$  – вхідна напруга;  $K_{PM}$  – коефіцієнт перетворення датчика PMS7003;  $K_{НП}$  – коефіцієнт перетворення нормуючого пристрою;  $K_{АЦП}$  – коефіцієнт перетворення АЦП.

Для NDIR-сенсора SCD30 рівняння перетворення має вигляд:

$$N_{x1} = U_{вх} \cdot K_{со} \cdot K_{НП} \cdot K_{АЦП}, \quad (3.6)$$

де:  $U_{вх}$  – вхідна напруга;  $K_{со}$  – коефіцієнт перетворення датчика PMS7003;  $K_{НП}$  – коефіцієнт перетворення нормуючого пристрою;  $K_{АЦП}$  – коефіцієнт перетворення АЦП.

Напруга на вході АЦП:

$$U_{АЦП} = U_{вх} \cdot K_{д} \cdot K_{НП} \cdot K_{АЦП}, \quad (3.7)$$

де:  $K_{д}$  – коефіцієнт перетворення для датчиків кисню, вологості, атмосферного тиску та швидкості повітря.

Цифровий код, який отримується на АЦП, залежить від значення вхідного аналогового сигналу [41-43].

$$N = E \cdot \left| \frac{A_{АЦП}}{q_x} + 0.5 \text{sign}x \right|, \quad (3.8)$$

де:  $q_x$  – ступінь квантування АЦП.

Рівняння лінеаризації матиме вигляд:

$$N_{x2} = U_{АЦП} \cdot K_{АЦП} \cdot \Delta_{кв}. \quad (3.9)$$

Рівняння на виході АЦП:

$$N = U_{вх} \cdot K_{д} \cdot K_{НП} \cdot K_{АЦП}. \quad (3.10)$$

Загальне рівняння перетворення системи:

$$Y(t) = FX(t), \quad (3.11)$$

де:  $\Delta$  – вектор похибок вимірювання сенсорів і АЦП.

Рівняння мультиплікативної складової похибки буде мати вигляд:

$$\delta_m = \delta_d + \delta_{нп} + \delta_{АЦП} + \delta_m. \quad (3.12)$$

Загальноприйнятий стандарт точності для вимірювання параметрів мікроклімату може бути в межах від  $\pm 1\%$  до  $\pm 5\%$  від повного діапазону вимірювання, тому:  $\delta_m \leq 5\%$

Мультиплікативна похибка АЦП є нелінійною,

$$\delta_{АЦП} = \gamma_{кв}, \quad (3.13)$$

де  $\gamma_{кв}$  – коефіцієнт (або складова) похибки квантування.

Тоді мультиплікативна похибка АЦП [44] не перевищує  $1\%$ ,  $|\delta_{АЦП}| \leq 1\%$ . Аналогічне обмеження для похибки вимірювального каналу (МК),  $|\delta_{МК}| \leq 1\%$ . Рівняння вимірювання з урахуванням адитивної складової похибки матиме вигляд:

$$N_x = U_{вх} \cdot K_d \cdot K_{нп} \cdot K_{АЦП} \cdot \Delta_a \cdot K_d \cdot K_{нп} \cdot K_{АЦП} \cdot \Delta_{кв}. \quad (3.14)$$

де:  $\Delta_{кв}$  – похибка квантування;  $K_d$  – коефіцієнт перетворення для датчика (температура, вологість, концентрації  $CO_2$  та пилу);  $K_{нп}$  – коефіцієнт перетворення нормуючого пристрою;  $K_{АЦП}$  – коефіцієнт перетворення АЦП; Абсолютна адитивна похибка визначається як:

$$\Delta = \Delta \cdot K_d \cdot K_{\text{НП}} \cdot K_{\text{АЦП}} + \Delta_{\text{КВ}} \quad (3.15)$$

Тому:

$$\Delta = \gamma \cdot U_{\text{Н}}, \quad (3.16)$$

де:  $U_{\text{Н}}$  – номінальне значення сигналу.

Оскільки АЦП Arduino Nano (Arduino Nano (ATmega328)) має опорну напругу АЦП, то:  $U_{\text{REF}} = 5.0(\text{В})$ . Тоді отримаємо таке значення абсолютної адитивної похибки:  $U_{\text{Н}} = 5,0(\text{В}) = 5000(\text{мВ})$  а  $\Delta = \gamma \cdot U_{\text{Н}} = 0,0006 \cdot 5000 = 3(\text{мВ})$ .

Далі побудуємо графіки залежності датчиків від цифрового коду. Ці графіки підтверджують, що всі вимірювальні канали інформаційно-вимірювальної системи контролю мікроклімату можуть бути адекватно описані лінійним узагальненим рівнянням перетворення. Це дозволяє використовувати матричну модель системи для аналізу точності, оцінки похибок та реалізації алгоритмів автоматичного керування мікрокліматом.

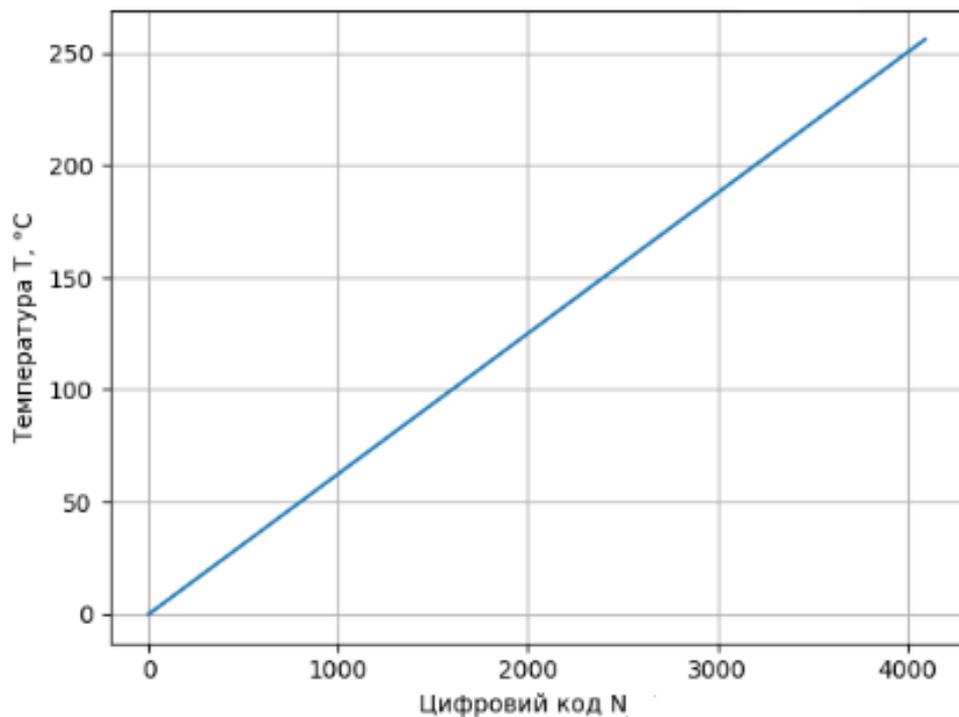


Рисунок 3.7 – Графік залежності для узагальненого рівняння перетворення на прикладі одного каналу ІВС — температурного (DS18B20)

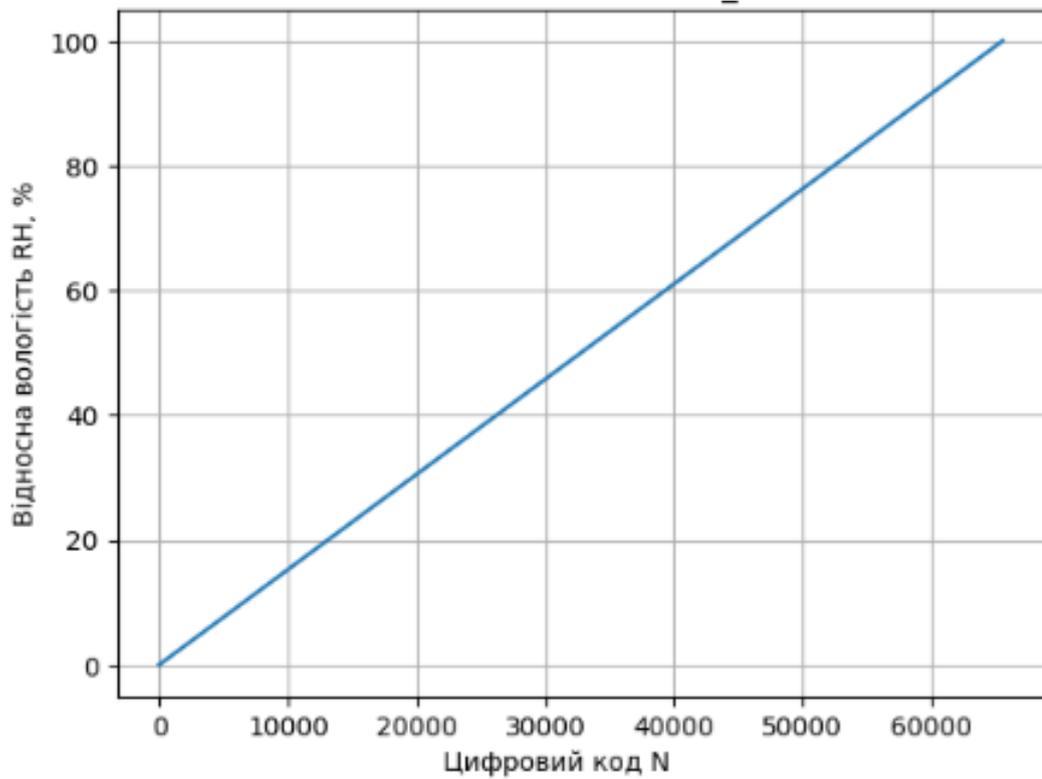


Рисунок 3.8 – Графік залежності вологості RH від цифрового коду

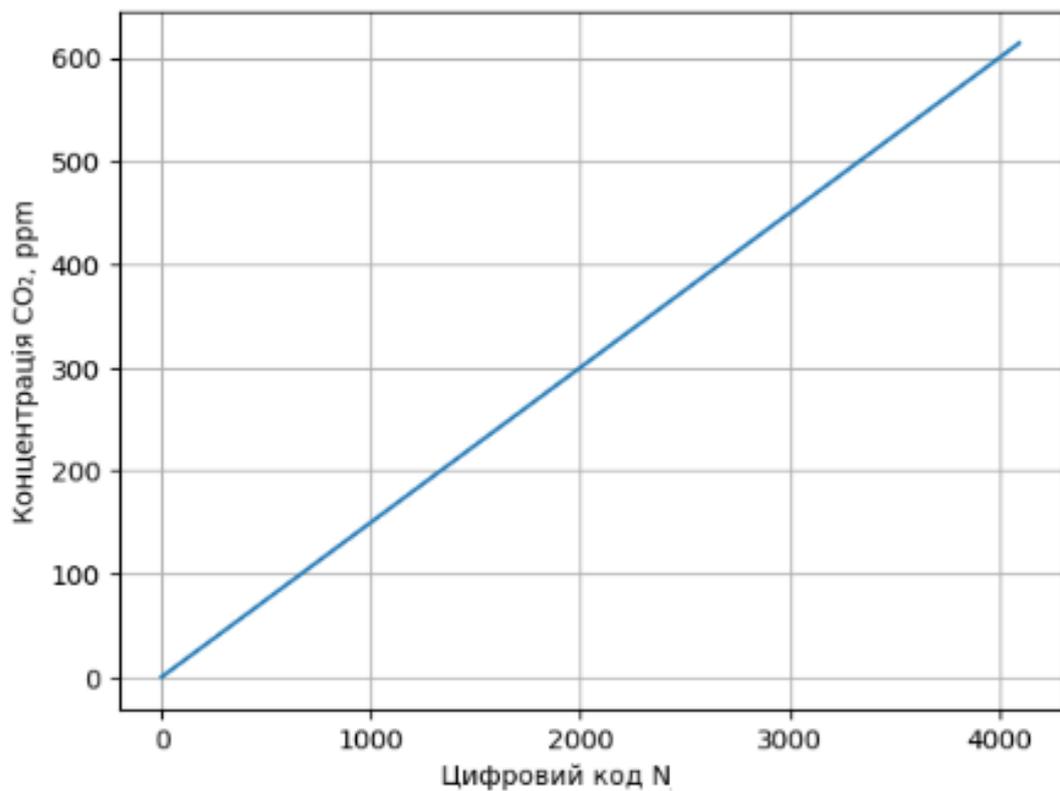


Рисунок 3.9 – Графік залежності концентрації CO<sub>2</sub> від цифрового коду

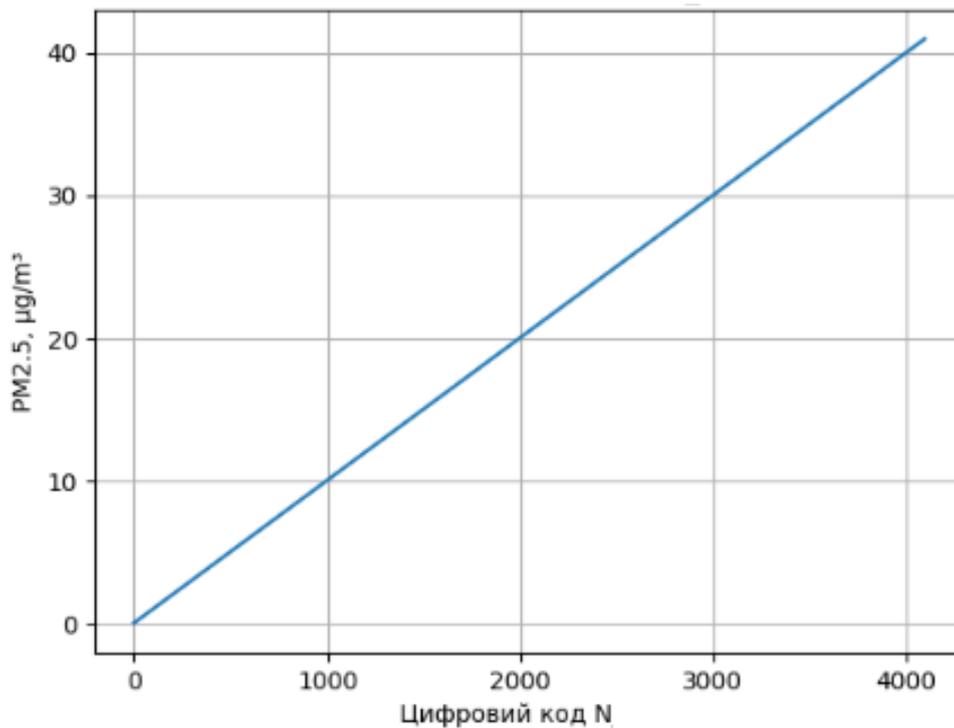


Рисунок 3.10 – Графік залежності концентрації пилу PM від цифрового коду (для лазерного сенсора PMS7003)

Незважаючи на те, що для кожного вимірювального каналу інформаційно-вимірювальної системи були отримані рівняння перетворення та підтверджена їх лінійність, важливо виконати теоретичну оцінку метрологічних характеристик, зокрема похибок вимірювання [45, 46]. Загальна похибка кожного каналу формується під впливом похибок первинного сенсора, нормуючого пристрою, аналого-цифрового перетворювача та похибки квантування.

Датчик температури (DS18B20) Згідно з технічною документацією, абсолютна похибка датчика температури DS18B20 у діапазоні:  $-10 \dots + 85 \text{ } ^\circ\text{C}$  становить:  $\Delta T = \pm 0,5 \text{ } ^\circ\text{C}$ , відносна похибка:

$$\delta_T = \frac{0,5}{100} \cdot 100\% \approx \pm 0,5\% \quad (3.17)$$

З урахуванням похибки АЦП та нормуючого пристрою загальна похибка температурного каналу не перевищує:  $\delta_{T,\Sigma} \leq \pm 1,5\%$

Датчик відносної вологості (RH). Для цифрових сенсорів вологості типу SHT-серії або аналогічних характерна похибка:  $\Delta RH = \pm(2 \dots 3)\%$ . Теоретично приймемо:  $\delta_{RH} = \pm 3\%$ .

Датчик концентрації CO<sub>2</sub> (NDIR, SCD30). Для NDIR-сенсорів типу SCD30 типова абсолютна похибка становить:  $\Delta CO_2 = \pm(30 \text{ ppm} + 3\% \text{ від показу})$ . Для середнього значення 1000 ppm відносна похибка:  $\delta_{CO_2} \approx \pm 3,5\%$ . З урахуванням АЦП та цифрової обробки:  $\delta_{CO_2, \Sigma} \leq \pm 4\%$ .

Датчик запиленості (PMS7003). Лазерні сенсори запиленості мають значну залежність від умов експлуатації. Для PMS7003 типова похибка:  $\delta_{PM} = \pm(10 \dots 15)\%$ . У рамках теоретичної оцінки приймаємо:  $\delta_{PM, \Sigma} \leq \pm 15\%$ . Це значення є допустимим для екологічного та мікрокліматичного моніторингу.

Датчик освітленості (LDR). Фоторезистори характеризуються нелінійністю та температурною залежністю. Типова похибка:  $\delta_{LDR} = \pm 10\%$ . З урахуванням АЦП:  $\delta_{LDR, \Sigma} \leq \pm 12\%$ .

Для 10-бітного АЦП Arduino Nano:

$$q = \frac{U_{REF}}{2^{10}} = \frac{5}{1024} \approx 4,88 \text{ мВ.} \quad (3.18)$$

Максимальна похибка квантування:

$$\Delta_{\text{кв}} = \pm \frac{q}{2} \approx \pm 2,44 \text{ мВ.} \quad (3.19)$$

Відносна похибка:

$$\delta_{\text{АЦП}} \leq 1\%. \quad (3.20)$$

Теоретична оцінка метрологічних характеристик показала, що:

- для температури та вологості забезпечується висока точність ( $\leq 4\%$ );

- для CO<sub>2</sub> досягається достатня точність для систем вентиляції та контролю якості повітря;
- для пилу та освітленості точність є достатньою для моніторингових задач;
- загальна похибка всіх каналів не перевищує допустимі значення  $\pm 5\%$ , прийняті для систем контролю мікроклімату.

Отже, розроблена інформаційно-вимірювальна система відповідає вимогам до точності, а отримані рівняння перетворення можуть бути використані для подальшого аналізу похибок, калібрування та реалізації алгоритмів автоматичного керування мікрокліматом.

### 3.3 Висновки до розділу

У третьому розділі магістерської кваліфікаційної роботи розглянуто питання метрологічного забезпечення та адаптації інформаційно-вимірювальної системи контролю параметрів мікроклімату до реальних умов експлуатації в підземних транспортних спорудах. Розділ поєднує інженерні розрахунки параметрів мікроклімату з аналізом метрологічних характеристик вимірювальних каналів, що дозволяє комплексно оцінити ефективність і придатність розробленої системи для практичного застосування.

Виконано розрахунок необхідних параметрів мікроклімату для проєктованої станції «Театральна» Вінницького метрополітену з використанням експлуатаційних характеристик станції-аналога «Арсенальна» Київського метрополітену. Такий підхід дозволив сформулювати консервативну розрахункову модель з урахуванням граничних теплових і вологісних навантажень, інтенсивності пасажиропотоку та режиму роботи станції. За результатами розрахунків визначено об'єм повітряного простору, сумарні теплові надходження та необхідні параметри вентиляції й кондиціонування для забезпечення комфортних умов перебування пасажирів і персоналу.

Проведено теоретичну оцінку метрологічних характеристик багатоканальної інформаційно-вимірювальної системи контролю мікроклімату. Встановлено, що кожен вимірювальний канал може бути адекватно описаний лінійним узагальненим рівнянням перетворення, що спрощує аналіз точності та реалізацію алгоритмів цифрової обробки сигналів. Проаналізовано основні складові похибки, зокрема похибки первинних сенсорів, нормуючих пристроїв, аналого-цифрового перетворювача та квантування.

Отримані теоретичні оцінки показали, що для температури, відносної вологості та концентрації CO<sub>2</sub> досягається достатньо висока точність, яка відповідає вимогам систем вентиляції та кондиціонування підземних споруд. Для каналів вимірювання запиленості та освітленості похибка є вищою, однак залишається в допустимих межах для задач екологічного та мікрокліматичного моніторингу. Загальна похибка вимірювальних каналів не перевищує  $\pm 5\%$ , що відповідає загальноприйнятим вимогам до систем контролю параметрів мікроклімату.

Таким чином, результати підтверджують, що розроблена інформаційно-вимірювальна система є метрологічно обґрунтованою, адаптованою до реальних умов експлуатації підземних транспортних споруд і придатною для подальшого впровадження. Отримані результати створюють основу для подальшого калібрування системи, оптимізації алгоритмів автоматичного керування мікрокліматом та інтеграції ІВС у сучасні системи диспетчерського та екологічного моніторингу.

#### 4 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

Науково-технічна розробка може бути впроваджена на практиці лише за умови її відповідності сучасним вимогам науково-технічного прогресу та економічної доцільності. У зв'язку з цим у межах науково-дослідної роботи особливої актуальності набуває проведення оцінки економічної ефективності отриманих результатів, що дозволяє обґрунтувати доцільність їх подальшого впровадження та використання.

Магістерська кваліфікаційна робота на тему «Інформаційно-вимірювальна система контролю параметрів мікроклімату в підземних транспортних спорудах» належить до науково-технічних проєктів, орієнтованих на можливий вихід на ринок. Рішення щодо комерціалізації результатів розробки може бути прийняте як на завершальному етапі виконання роботи, так і в процесі її реалізації.

Обраний напрям дослідження є актуальним, оскільки розроблена система потенційно може бути корисною широкому колу споживачів, забезпечуючи підвищення рівня безпеки та ефективності експлуатації підземних транспортних споруд, а також сприяючи отриманню економічного ефекту від її впровадження.

Водночас реалізація даного проєкту потребує залучення потенційного інвестора, що зумовлює необхідність детального економічного обґрунтування запропонованого технічного рішення. Саме тому важливим завданням є доведення економічної ефективності та доцільності впровадження науково-технічної розробки, що і визначає зміст подальших розрахунків у межах даного розділу.

#### 4.1 Проведення комерційного та технологічного аудиту науково-технічної розробки

Метою проведення комерційного і технологічного аудиту дослідження за темою «Інформаційно-вимірювальна система контролю параметрів мікроклімату в підземних транспортних спорудах» є оцінювання науково-технічного рівня та рівня комерційного потенціалу розробки, створеної в результаті науково-технічної діяльності.

Оцінювання науково-технічного рівня розробки та її комерційного потенціалу рекомендується здійснювати із застосуванням 5-ти бальної системи оцінювання за 12-ма критеріями, наведеними в табл. 4.1 [47,48].

Таблиця 4.1 – Рекомендовані критерії оцінювання науково-технічного рівня і комерційного потенціалу розробки та бальна оцінка

Бали (за 5-ти бальною шкалою)					
	0	1	2	3	4
Технічна здійсненність концепції					
1	Достовірність концепції не підтверджена	Концепція підтверджена експертними висновками	Концепція підтверджена розрахунками	Концепція перевірена на практиці	Перевірено працездатність продукту в реальних умовах
Ринкові переваги (недоліки)					
2	Багато аналогів на малому ринку	Мало аналогів на малому ринку	Кілька аналогів на великому ринку	Один аналог на великому ринку	Продукт не має аналогів на великому ринку
3	Ціна продукту значно вища за ціни аналогів	Ціна продукту дещо вища за ціни аналогів	Ціна продукту приблизно дорівнює цінам аналогів	Ціна продукту дещо нижче за ціни аналогів	Ціна продукту значно нижче за ціни аналогів

Продовження таблиці 4.1

4	Технічні та споживчі властивості продукту значно гірші, ніж в аналогів	Технічні та споживчі властивості продукту трохи гірші, ніж в аналогів	Технічні та споживчі властивості продукту на рівні аналогів	Технічні та споживчі властивості продукту трохи кращі, ніж в аналогів	Технічні та споживчі властивості продукту значно кращі, ніж в аналогів
5	Експлуатаційні витрати значно вищі, ніж в аналогів	Експлуатаційні витрати дещо вищі, ніж в аналогів	Експлуатаційні витрати на рівні експлуатаційних витрат аналогів	Експлуатаційні витрати трохи нижчі, ніж в аналогів	Експлуатаційні витрати значно нижчі, ніж в аналогів
Ринкові перспективи					
6	Ринок малий і не має позитивної динаміки	Ринок малий, але має позитивну динаміку	Середній ринок з позитивною динамікою	Великий стабільний ринок	Великий ринок з позитивною динамікою
7	Активна конкуренція великих компаній на ринку	Активна конкуренція	Помірна конкуренція	Незначна конкуренція	Конкуренція немає
Практична здійсненність					
8	Відсутні фахівці як з технічної, так і з комерційної реалізації ідеї	Необхідно наймати фахівців або витратити значні кошти та час на навчання наявних фахівців	Необхідне незначне навчання фахівців та збільшення їх штату	Необхідне незначне навчання фахівців	Є фахівці з питань як з технічної, так і з комерційної реалізації ідеї
9	Потрібні значні фінансові ресурси, які відсутні. Джерела фінансування ідеї відсутні	Потрібні незначні фінансові ресурси. Джерела фінансування відсутні	Потрібні значні фінансові ресурси. Джерела фінансування є	Потрібні незначні фінансові ресурси. Джерела фінансування є	Не потребує додаткового фінансування
10	Необхідна розробка нових матеріалів	Потрібні матеріали, що використовуються у військово-промисловому комплексі	Потрібні дорогі матеріали	Потрібні досяжні та дешеві матеріали	Всі матеріали для реалізації ідеї відомі та давно використовуються у виробництві

Продовження таблиці 4.1

11	Термін реалізації ідеї більший за 10 років	Термін реалізації ідеї більший за 5 років. Термін окупності інвестицій більше 10-ти років	Термін реалізації ідеї від 3-х до 5-ти років. Термін окупності інвестицій більше 5-ти років	Термін реалізації ідеї менше 3-х років. Термін окупності інвестицій від 3-х до 5-ти років	Термін реалізації ідеї менше 3-х років. Термін окупності інвестицій менше 3-х років
12	Необхідна розробка регламентних документів та отримання великої кількості дозвільних документів на виробництво та реалізацію продукту	Необхідно отримання великої кількості дозвільних документів на виробництво та реалізацію продукту, що вимагає значних коштів та часу	Процедура отримання дозвільних документів для виробництва та реалізації продукту вимагає незначних коштів та часу	Необхідно тільки повідомлення відповідним органам про виробництво та реалізацію продукту	Відсутні будь-які регламентні обмеження на виробництво та реалізацію продукту

Результати оцінювання науково-технічного рівня та комерційного потенціалу науково-технічної розробки потрібно звести до таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – Результати оцінювання науково-технічного рівня і комерційного потенціалу розробки експертами

Критерії	Експерти		
	Савицький А.Ю.	Осадчук О.В.	Притула М.О.
	Бали:		
1. Технічна здійсненність концепції	4	4	4
2. Ринкові переваги (наявність аналогів)	4	4	4
3. Ринкові переваги (ціна продукту)	2	2	1
4. Ринкові переваги (технічні властивості)	4	3	4
5. Ринкові переваги (експлуатаційні витрати)	2	2	3
6. Ринкові перспективи (розмір ринку)	3	3	3
7. Ринкові перспективи (конкуренція)	2	2	2
8. Практична здійсненність (наявність фахівців)	4	4	3
9. Практична здійсненність (наявність фінансів)	2	3	3
10. Практична здійсненність (необхідність нових матеріалів)	3	4	4
11. Практична здійсненність (термін реалізації)	3	4	4
12. Практична здійсненність (розробка документів)	4	4	3
Сума балів	37	39	38
Середньоарифметична сума балів $СБ_c$	38,0		

За результатами розрахунків, наведених в таблиці 4.2, зробимо висновок щодо науково-технічного рівня і рівня комерційного потенціалу розробки. При цьому використаємо рекомендації, наведені в табл. 4.3 [47,48].

Таблиця 4.3 – Науково-технічні рівні та комерційні потенціали розробки

Середньоарифметична сума балів СБ розрахована на основі висновків експертів	Науково-технічний рівень та комерційний потенціал розробки
41...48	Високий
31...40	Вище середнього
21...30	Середній
11...20	Нижче середнього
0...10	Низький

Згідно проведених досліджень рівень комерційного потенціалу розробки за темою «Інформаційно-вимірювальна система контролю параметрів мікроклімату в підземних транспортних спорудах» становить 38,0 бала, що, відповідно до таблиці 4.3, свідчить про комерційну важливість проведення даних досліджень (рівень комерційного потенціалу розробки вище середнього).

#### 4.2 Розрахунок узагальненого коефіцієнта якості розробки

Окрім комерційного аудиту розробки доцільно також розглянути технічний рівень якості розробки, розглянувши її основні технічні показники. Ці показники по-різному впливають на загальну якість проектної розробки.

Узагальнений коефіцієнт якості ( $B_n$ ) для нового технічного рішення розрахуємо за формулою [47,48]

$$B_n = \sum_{i=1}^k \alpha_i \cdot \beta_i, \quad (4.1)$$

де  $k$  – кількість найбільш важливих технічних показників, які впливають на якість нового технічного рішення;

$\alpha_i$  – коефіцієнт, який враховує питому вагу  $i$ -го технічного показника в загальній якості розробки. Коефіцієнт  $\alpha_i$  визначається експертним шляхом

і при цьому має виконуватись умова  $\sum_{i=1}^k \alpha_i = 1$ ;

$\beta_i$  – відносне значення  $i$ -го технічного показника якості нової розробки.

Відносні значення  $\beta_i$  для різних випадків розраховуємо за такими формулами:

- для показників, зростання яких вказує на підвищення в лінійній залежності якості нової розробки

$$\beta_i = \frac{I_{ni}}{I_{ai}}, \quad (4.2)$$

де  $I_{ni}$  та  $I_{na}$  – чисельні значення конкретного  $i$ -го технічного показника якості відповідно для нової розробки та аналога;

- для показників, зростання яких вказує на погіршення в лінійній залежності якості нової розробки

$$\beta_i = \frac{I_{ai}}{I_{ni}}; \quad (4.3)$$

Використовуючи наведені залежності можемо проаналізувати та порівняти техніко-економічні характеристики аналогу та розробки на основі отриманих наявних та проектних показників, а результати порівняння зведемо до таблиці 4.4.

Таблиця 4.4 – Порівняння основних параметрів розробки та аналога.

Показники (параметри)	Одиниця вимірю- вання	Аналог	Проектований пристрій	Відношення параметрів нової розробки до аналога	Питома вага показника
Точність визначення	%	3	2	2	0,25
Градiєнт вихідного сигналу	мВ	4	2	3	0,2
Інерційність системи	с	2	0,4	10	0,15
Порiг детектування	мВ	До 1	До 0,5	3	0,25
Експлуатаційна придатність	Умовні Одиниці	10	10	1,1	0,15

Узагальнений коефіцієнт якості ( $B_n$ ) для нового технічного рішення складе

$$B_n = \sum_{i=1}^k \alpha_i \cdot \beta_i =$$

$$1,5 \cdot 0,25 + 2 \cdot 0,2 + 5 \cdot 0,15 + 2 \cdot 0,25 + 1 \cdot 0,15 = 0,375 + 0,4 + 0,75 + 0,5 + 0,15 = 2,175$$

Отже за технічними параметрами, згідно узагальненого коефіцієнту якості розробки, науково-технічна розробка переважає існуючі аналоги приблизно в 2 рази.

#### 4.3 Розрахунок витрат на проведення науково-дослідної роботи

Витрати, пов'язані з проведенням науково-дослідної роботи на тему «Інформаційно-вимірювальна система контролю параметрів мікроклімату в підземних транспортних спорудах», під час планування, обліку і

калькулювання собівартості науково-дослідної роботи групуємо за відповідними статтями.

Витрати на оплату праці. До статті «Витрати на оплату праці» належать витрати на виплату основної та додаткової заробітної плати керівникам відділів, лабораторій, секторів і груп, науковим, інженерно-технічним працівникам, конструкторам, технологам, креслярам, копіювальникам, лаборантам, робітникам, студентам, аспірантам та іншим працівникам, безпосередньо зайнятим виконанням конкретної теми, обчисленої за посадовими окладами, відрядними розцінками, тарифними ставками згідно з чинними в організаціях системами оплати праці.

Основна заробітна плата дослідників. Витрати на основну заробітну плату дослідників ( $Z_o$ ) розраховуємо у відповідності до посадових окладів працівників, за формулою [47,48]

$$Z_o = \sum_{i=1}^k \frac{M_{ni} \cdot t_i}{T_p}, \quad (4.4)$$

де  $k$  – кількість посад дослідників залучених до процесу досліджень;

$M_{ni}$  – місячний посадовий оклад конкретного дослідника, (грн.);

$t_i$  – число днів роботи конкретного дослідника, дн.;

$T_p$  – середнє число робочих днів в місяці,  $T_p=21$  дні.

$$Z_o = 17750,00 \cdot 10 / 21 = 7727,30 \text{ (грн.)}$$

$\Pi B_n = \sum_{i=1}^k \alpha_i \cdot \beta_i$  ро́ведені розрахунки зведемо до таблиці 4.5.

Таблиця 4.5 – Витрати на заробітну плату дослідників

Найменування посади	Місячний посадовий оклад, грн	Оплата за робочий день, грн	Число днів роботи	Витрати на заробітну плату, грн
Project Manager	30000,00	145,8	10	14285,71
Engineer	28000,00	1333,33	21	28000,00
Technician (Category II)	10000,00	476,10	10	4761,90
Всього				47047,61

Основна заробітна плата робітників. Витрати на основну заробітну плату робітників ( $Z_p$ ) за відповідними найменуваннями робіт НДР на тему «Інформаційно-вимірювальна система контролю параметрів мікроклімату в підземних транспортних спорудах» розраховуємо за формулою

$$Z_p = \sum_{i=1}^n C_i \cdot t_i, \quad (4.5)$$

де  $C_i$  – погодинна тарифна ставка робітника відповідного розряду, за виконану відповідну роботу, (грн/год.);

$t_i$  – час роботи робітника при виконанні визначеної роботи, год.

Погодинну тарифну ставку робітника відповідного розряду  $C_i$  можна визначити за формулою

$$C_i = \frac{M_M \cdot K_i \cdot K_c}{T_p \cdot t_{зм}}, \quad (4.6)$$

де  $M_M$  – розмір прожиткового мінімуму працездатної особи, або мінімальної місячної заробітної плати (в залежності від діючого законодавства), прийmemo  $M_M=8000,00$  (грн.);

$K_i$  – коефіцієнт міжкваліфікаційного співвідношення для встановлення тарифної ставки робітнику відповідного розряду (табл. Б.2, додаток Б) [47,48];

$K_c$  – мінімальний коефіцієнт співвідношень місячних тарифних ставок робітників першого розряду з нормальними умовами праці виробничих об'єднань і підприємств до законодавчо встановленого розміру мінімальної заробітної плати.

$T_p$  – середнє число робочих днів в місяці, приблизно  $T_p = 21$  дн;

$t_{зм}$  – тривалість зміни, год.

$$C_I = 8000,00 \cdot 1,70 \cdot 1,15 / (21 \cdot 8) = 93,10 \text{ (грн.)}$$

$$З_{pl} = 93,10 \cdot 8,00 = 744,76 \text{ (грн.)}$$

Таблиця 4.6 – Величина витрат на основну заробітну плату робітників

Найменування робіт	Тривалість роботи, год	Розряд роботи	Тарифний коефіцієнт	Погодинна тарифна ставка, грн	Величина оплати на робітника грн
Розроблення структурної схеми пристрою	11,5	5	1,70	93,10	1069,00
Виготовлення друкованої плати	12,00	6	2,00	109,52	1314,29
Налагодження електронних компонентів	3,00	5	1,70	93,10	279,29
Проведення функціональних випробувань плати	4,00	6	2,00	109,52	438,10
Механічна обробка та підгонка корпусу	1,20	5	1,70	93,10	111,71
Монтаж та збирання електронного модуля	0,80	6	2,00	109,52	87,62
Всього					3300,00

Додаткова заробітна плата дослідників та робітників, Додаткову заробітну плату розраховуємо як 10 ... 12% від суми основної заробітної плати дослідників та робітників за формулою

$$Z_{\text{доод}} = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{H_{\text{доод}}}{100\%}, \quad (4.7)$$

де  $H_{\text{доод}}$  – норма нарахування додаткової заробітної плати. Прийmemo 10%.

$$Z_{\text{доод}} = (47047,61 + 3300,76) \cdot 10 / 100\% = 5034,76 \text{ (грн.)}$$

Відрахування на соціальні заходи. Нарахування на заробітну плату дослідників та робітників розраховуємо як 22% від суми основної та додаткової заробітної плати дослідників і робітників за формулою

$$Z_n = (Z_o + Z_p + Z_{\text{доод}}) \cdot \frac{H_{\text{зн}}}{100\%} \quad (4.8)$$

де  $H_{\text{зн}}$  – норма нарахування на заробітну плату. Приймаємо 22%.

$$Z_n = (47047,61 + 3300,76 + 5034,76) \cdot 22 / 100\% = 12184,12 \text{ (грн.)}$$

Сировина та матеріали. До статті «Сировина та матеріали» належать витрати на сировину, основні та допоміжні матеріали, інструменти, пристрої та інші засоби і предмети праці, які придбані у сторонніх підприємств, установ і організацій та витрачені на проведення досліджень за темою «Інформаційно-вимірювальна система контролю параметрів мікроклімату в підземних транспортних спорудах».

Витрати на матеріали ( $M$ ), у вартісному вираженні розраховуються окремо по кожному виду матеріалів за формулою

$$M = \sum_{j=1}^n H_j \cdot C_j \cdot K_j - \sum_{j=1}^n B_j \cdot C_{\text{е}j}, \quad (4.9)$$

де  $H_j$  – норма витрат матеріалу  $j$ -го найменування, кг;

$n$  – кількість видів матеріалів;

$C_j$  – вартість матеріалу  $j$ -го найменування, (грн/кг.);

$K_j$  – коефіцієнт транспортних витрат, ( $K_j = 1,1 \dots 1,15$ );

$B_j$  – маса відходів  $j$ -го найменування, кг;  $C_{\theta j}$  – вартість відходів  $j$ -го найменування, (грн/кг.).

$$M_1 = 2,0 \cdot 180,00 \cdot 1,1 - 0 \cdot 0 = 396,00 \text{ (грн.)}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці 4.7.

Таблиця 4.7 – Витрати на матеріали

Найменування матеріалу, марка, тип, сорт	Ціна за 1 кг, грн	Норма витрат, кг	Величина відходів, кг	Ціна відходів, грн/кг	Вартість витраченого матеріалу, грн
Портативний тверdotілий накопичувач даних	180,00	2,0	0	0	668,22
Лазерний носій архівної інформації	25,00	4,0	0	0	110,00
Витратний модуль для друкувального обладнання	920,00	1,0	0	0	1012,00
Комплект офісних витратних матеріалів	195,00	3,0	0	0	643,50
Система настільного впорядкування документів	183,00	3,0	0	0	603,90
Блок паперових листів для оперативних записів	90,00	4,0	0	0	396,00
Паперовий носій для офісного документообігу	212,00	2,0	0	0	466,40

Продовження таблиці 4.7

Хімічний реагент для травлення металізованих поверхонь	265,00	0,050	0	0	14,58
Електропровідник для внутрішнього монтажу	15,50	0,050	0	0	0,85
Полімерне захисне покриття електронних вузлів	328,00	0,020	0	0	7,22
Очищувальний спиртовмісний розчин технічного призначення	240,00	0,250	0	0	66,00
Металевий сплав для паяльних з'єднань	563,00	0,010	0	0	6,19
Активатор паяльного процесу для електромонтажних робіт	468,00	0,010	0,000	0,00	5,15
Всього					4000,00

Розрахунок витрат на комплектуючі. Витрати на комплектуючі ( $K_6$ ), які використовують при проведенні НДР на тему «Інформаційно-вимірювальна система контролю параметрів мікроклімату в підземних транспортних спорудах», розраховуємо, згідно з їхньою номенклатурою, за формулою

$$K_6 = \sum_{j=1}^n H_j \cdot C_j \cdot K_j \quad (4.10)$$

де  $H_j$  – кількість комплектуючих  $j$ -го виду, шт.;

$C_j$  – покупна ціна комплектуючих  $j$ -го виду, (грн.);

$K_j$  – коефіцієнт транспортних витрат, ( $K_j = 1,1 \dots 1,15$ ).

$$K_6 = 1 \cdot 165,00 \cdot 1,1 = 181,50 \text{ (грн.)}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці 4.8.

Таблиця 4.8 – Витрати на комплектуючі

Найменування комплектуючих	Кількість, шт.	Ціна за штуку, грн	Сума, грн
Візуальний модуль відображення на основі електрофоретичної технології	1	165,00	265,00
Електричні з'єднувальні елементи з благородного металу	1	105,00	115,50
Програмно-керований вбудований обчислювальний модуль	1	354,00	389,40
Захисна конструктивна оболонка пристрою	1	206,00	226,60
Модуль перетворення та стабілізації електроживлення	1	185,00	203,50
Всього			1200

Спецустаткування для наукових (експериментальних) робіт. До статті «Спецустаткування для наукових (експериментальних) робіт» належать витрати на виготовлення та придбання спецустаткування необхідного для проведення досліджень, також витрати на їх проектування, виготовлення, транспортування, монтаж та встановлення.

Балансову вартість спецустаткування розраховуємо за формулою

$$B_{\text{спец}} = \sum_{i=1}^k C_i \cdot C_{\text{пр.}i} \cdot K_i, \quad (4.11)$$

де  $C_i$  – ціна придбання одиниці спецустаткування даного виду, марки, (грн.);

$C_{np.i}$  – кількість одиниць устаткування відповідного найменування, які придбані для проведення досліджень, шт.;

$K_i$  – коефіцієнт, що враховує доставку, монтаж, налагодження устаткування тощо, ( $K_i = 1,10 \dots 1,12$ );

$k$  – кількість найменувань устаткування.

$$B_{спец} = 7818,00 \cdot 1 \cdot 1,1 = 8599,80 \text{ (грн.)}$$

Отримані результати зведемо до таблиці 4.9.

Таблиця 4.9 – Витрати на придбання спецустаткування по кожному виду

Найменування устаткування	Кількість, шт	Ціна за одиницю, грн	Вартість, грн
Цифровий прилад візуалізації електричних сигналів у часовій області	1	7818,00	9660,00
Вимірювальний модуль контролю електричної напруги	1	9400,00	10340,00
Всього			20000,00

Програмне забезпечення для наукових (експериментальних) робіт. До статті «Програмне забезпечення для наукових (експериментальних) робіт» належать витрати на розробку та придбання спеціальних програмних засобів і програмного забезпечення, (програм, алгоритмів, баз даних) необхідних для проведення досліджень, також витрати на їх проектування, формування та встановлення.

Балансову вартість програмного забезпечення розраховуємо за формулою

$$B_{прог} = \sum_{i=1}^k C_{инрг} \cdot C_{прог.i} \cdot K_i, \quad (4.12)$$

де  $C_{inpr2}$  – ціна придбання одиниці програмного засобу даного виду, (грн.);

$C_{pr2.i}$  – кількість одиниць програмного забезпечення відповідного найменування, які придбані для проведення досліджень, шт.;

$K_i$  – коефіцієнт, що враховує інсталяцію, налагодження програмного засобу тощо, ( $K_i = 1,10 \dots 1,12$ );

$k$  – кількість найменувань програмних засобів.

$$V_{pr2} = 7910,00 \cdot 1 \cdot 1,1 = 8701,00 \text{ (грн.)}$$

Отримані результати зведемо до таблиці 4.10

Таблиця 4.10 – Витрати на придбання програмних засобів по кожному виду

Найменування програмного засобу	Кількість, шт	Ціна за одиницю, грн	Вартість, грн
Інтегроване програмне середовище для інженерних розрахунків та комп'ютерного моделювання	1	7910,00	8701,00
Послуга доступу до глобальної інформаційної мережі з підвищеною пропускну здатністю (плата за місяць)	1	350,00	819,00
Всього			17000,00

Амортизація обладнання, програмних засобів та приміщень. В спрощеному вигляді амортизаційні відрахування по кожному виду обладнання, приміщень та програмному забезпеченню тощо, розраховуємо з використанням прямолінійного методу амортизації за формулою

$$A_{обл} = \frac{C_{б}}{T_{б}} \cdot \frac{t_{вик}}{12}, \quad (5.13)$$

де  $C_{б}$  – балансова вартість обладнання, програмних засобів, приміщень тощо, які використовувались для проведення досліджень, (грн.);

$t_{вик}$  – термін використання обладнання, програмних засобів, приміщень під час досліджень, місяців;

$T_в$  – строк корисного використання обладнання, програмних засобів, приміщень тощо, років.

$$A_{обл} = (38999,00 \cdot 1) / (3 \cdot 12) = 1083,31 \text{ (грн.)}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці 4.11.

Таблиця 4.11 – Амортизаційні відрахування по кожному виду обладнання

Найменування обладнання	Балансова вартість, грн	Строк корисного використання, років	Термін використання обладнання, місяців	Амортизаційні відрахування, грн
Інтегроване цифрове середовище автоматизованого інженерного проектування	38999,00	3	1	1116,01
Комплекс апаратно-програмних засобів для вимірювання та аналізу параметрів	14520,00	5	1	242,00
Мережевий керуючий пристрій корпоративного класу для маршрутизації даних	2249,00	4	1	46,85
Електронний прилад часово-амплітудного аналізу сигналів	7200,00	5	1	120,00
Еталонний засіб контролю електричної напруги	18000,00	5	1	300,00

Продовження таблиці 4.11

Спеціалізований дослідницький простір для проведення експериментальних робіт	380000,00	25	1	1266,67
Професійно обладнана інженерна станція для конструкторських робіт	8960,00	5	1	149,33
Комплекс офісного технічного оснащення	9400,00	4	1	195,83
Системне та прикладне програмне забезпечення загальноофісного призначення	10200,00	3	1	283,33
Технічні засоби для виконання електромонтажних операцій	6700,00	7	1	79,76
Всього				3800,00

Паливо та енергія для науково-виробничих цілей. Витрати на силову електроенергію ( $B_e$ ) розраховуємо за формулою

$$B_e = \sum_{i=1}^n \frac{W_{yi} \cdot t_i \cdot C_e \cdot K_{eni}}{\eta_i}, \quad (4.14)$$

де  $W_{yi}$  – встановлена потужність обладнання на визначеному етапі розробки, кВт;

$t_i$  – тривалість роботи обладнання на етапі дослідження, год;

$C_e$  – вартість 1 кВт-години електроенергії, (грн.); (вартість електроенергії визначається за даними енергопостачальної компанії), прийємо  $C_e = 12,56$  (грн.);

$K_{eni}$  – коефіцієнт, що враховує використання потужності,  $K_{eni} < 1$ ;

$\eta_i$  – коефіцієнт корисної дії обладнання,  $\eta_i < 1$ .

$$V_e = 0,32 \cdot 160,0 \cdot 12,56 \cdot 0,95 / 0,97 = 630,84 \text{ (грн.)}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці 4.12.

Таблиця 4.12 – Витрати на електроенергію

Найменування обладнання	Встановлена потужність, кВт	Тривалість роботи, год	Сума, (грн.)
Цифрове середовище автоматизованого інженерного проєктування	0,32	160,0	780,75
Апаратно-програмний модуль вимірювання та аналізу технічних параметрів	0,10	20,0	24,58
Інтелектуальний мережевий шлюз для керування передачею даних	0,03	160,0	58,92
Цифровий засіб візуалізації та аналізу електричних сигналів	0,08	20,0	19,66
Сертифікований прилад контрольного вимірювання напруги	0,09	20,0	22,13
Комплект технічних засобів для виконання електромонтажних операцій	0,50	1,5	9,20
Професійно оснащена інженерна робоча станція конструкторського призначення	0,12	160,0	235,96
Сукупність офісних технічних та периферійних засобів	0,32	3,0	11,08
Всього			1100,00

Службові відрядження. До статті «Службові відрядження» дослідної роботи на тему «Інформаційно-вимірювальна система контролю параметрів мікроклімату в підземних транспортних спорудах» належать витрати на відрядження штатних працівників, працівників організацій, які працюють за договорами цивільно-правового характеру, аспірантів, зайнятих розробленням досліджень, відрядження, пов'язані з проведенням випробувань машин та приладів, а також витрати на відрядження на наукові з'їзди, конференції, наради, пов'язані з виконанням конкретних досліджень.

Витрати за статтею «Службові відрядження» відсутні.

Витрати на роботи, які виконують сторонні підприємства, установи і організації. Витрати за статтею «Витрати на роботи, які виконують сторонні підприємства, установи і організації» відсутні.

Інші витрати. До статті «Інші витрати» належать витрати, які не знайшли відображення у зазначених статтях витрат і можуть бути віднесені безпосередньо на собівартість досліджень за прямими ознаками.

Витрати за статтею «Інші витрати» розраховуємо як 50...100% від суми основної заробітної плати дослідників та робітників за формулою

$$I_e = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{H_{ie}}{100\%}, \quad (4.15)$$

де  $H_{ie}$  – норма нарахування за статтею «Інші витрати», прийmemo  $H_{ib} = 50\%$ .

$$I_e = (47047,61 + 3300,00) \cdot 50 / 100\% = 25173,81 \text{ (грн.)}$$

Накладні (загальновиробничі) витрати. До статті «Накладні (загальновиробничі) витрати» належать: витрати, пов'язані з управлінням організацією; витрати на винахідництво та раціоналізацію; витрати на підготовку (перепідготовку) та навчання кадрів; витрати, пов'язані з набором

робочої сили; витрати на оплату послуг банків; витрати, пов'язані з освоєнням виробництва продукції; витрати на науково-технічну інформацію та рекламу та ін.

Витрати за статтею «Накладні (загальновиробничі) витрати» розраховуємо як 100...150% від суми основної заробітної плати дослідників та робітників за формулою

$$B_{нзв} = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{H_{нзв}}{100\%}, \quad (4.16)$$

де  $H_{нзв}$  – норма нарахування за статтею «Накладні (загальновиробничі) витрати», прийmemo  $H_{нзв} = 100\%$ .

$$B_{нзв} = (47047,61 + 3300,00) \cdot 100 / 100\% = 50347,61 \text{ (грн.)}$$

Витрати на проведення науково-дослідної роботи на тему «Інформаційно-вимірювальна система контролю параметрів мікроклімату в підземних транспортних спорудах» розраховуємо як суму всіх попередніх статей витрат за формулою

$$B_{заг} = Z_o + Z_p + Z_{од} + Z_n + M + K_v + B_{стц} + B_{прз} + A_{обл} + B_e + B_{св} + B_{сн} + I_v + B_{нзв}. \quad (5.17)$$

$$B_{заг} = 47047,61 + 3300,00 + 5034,76 + 12184,12 + 4000,00 + 1200,00 + 18939,80 + 16566,00 + 3767,09 + 1011,67 + 25173,81 + 50347,61 = 188572,47 \text{ (грн.)}$$

Загальні витрати  $ZB$  на завершення науково-дослідної (науково-технічної) роботи та оформлення її результатів розраховується за формулою

$$ZB = \frac{B_{заг}}{\eta}, \quad (4.18)$$

де  $\eta$  - коефіцієнт, який характеризує етап (стадію) виконання науково-дослідної роботи, прийmemo  $\eta=0,9$ .

$$ЗВ = 188572,47 / 0,9 = 209524,97 \text{ (грн.)}$$

#### 4.4 Розрахунок економічної ефективності науково-технічної розробки при її можливій комерціалізації потенційним інвестором

В ринкових умовах узагальнюючим позитивним результатом, що його може отримати потенційний інвестор від можливого впровадження результатів цієї чи іншої науково-технічної розробки, є збільшення у потенційного інвестора величини чистого прибутку.

Результати дослідження проведені за темою «Інформаційно-вимірювальна система контролю параметрів мікроклімату в підземних транспортних спорудах» передбачають комерціалізацію протягом 4-х років реалізації на ринку.

В цьому випадку майбутній економічний ефект буде формуватися на основі таких даних:

$\Delta N$  – збільшення кількості споживачів пристрою, у періоди часу, що аналізуються, від покращення його певних характеристик;

Показник	1-й рік	2-й рік	3-й рік	4-й рік
Збільшення кількості споживачів, осіб	500	1000	1300	1100

$N$  – кількість споживачів які використовували аналогічний пристрій у році до впровадження результатів нової науково-технічної розробки, прийmemo 12000 осіб;

$C_0$  – вартість пристрою у році до впровадження результатів розробки, прийmemo 1200,00 (грн.);

$\pm \Delta C_0$  – зміна вартості пристрою від впровадження результатів науково-технічної розробки, прийmemo 518,00 (грн.).

Можливе збільшення чистого прибутку у потенційного інвестора  $\Delta\Pi_i$  для кожного із 4-х років, протягом яких очікується отримання позитивних результатів від можливого впровадження та комерціалізації науково-технічної розробки, розраховуємо за формулою [46]

$$\Delta\Pi_i = (\pm\Delta C_o \cdot N + C_o \cdot \Delta N)_i \cdot \lambda \cdot \rho \cdot \left(1 - \frac{\vartheta}{100}\right), \quad (4.19)$$

де  $\lambda$  – коефіцієнт, який враховує сплату потенційним інвестором податку на додану вартість. У 2025 році ставка податку на додану вартість складає 20%, а коефіцієнт  $\lambda = 0,8333$ ;

$\rho$  – коефіцієнт, який враховує рентабельність інноваційного продукту).

Прийmemo  $\rho = 35\%$ ;

$\vartheta$  – ставка податку на прибуток, який має сплачувати потенційний інвестор, у 2025 році  $\vartheta = 18\%$ ;

Збільшення чистого прибутку 1-го року:

$$\Delta\Pi_1 = 1691100,17 \text{ (грн.)}$$

Збільшення чистого прибутку 2-го року:

$$\Delta\Pi_2 = 2103593,00 \text{ (грн.)}$$

Збільшення чистого прибутку 3-го року:

$$\Delta\Pi_3 = 2637148,33 \text{ (грн.)}$$

Збільшення чистого прибутку 4-го року:

$$\Delta\Pi_4 = 3088526,50 \text{ (грн.)}$$

Приведена вартість збільшення всіх чистих прибутків  $\Pi\Pi$ , що їх може отримати потенційний інвестор від можливого впровадження та комерціалізації науково-технічної розробки

$$\Pi\Pi = \sum_{i=1}^T \frac{\Delta\Pi_i}{(1 + \tau)^t}, \quad (4.20)$$

де  $\Delta\Pi_i$  – збільшення чистого прибутку у кожному з років, протягом яких виявляються результати впровадження науково-технічної розробки, (грн.);

$T$  – період часу, протягом якого очікується отримання позитивних результатів від впровадження та комерціалізації науково-технічної розробки, роки;

$\tau$  – ставка дисконтування, за яку можна взяти щорічний прогнозований рівень інфляції в країні,  $\tau=0,15$ ;

$t$  – період часу (в роках) від моменту початку впровадження науково-технічної розробки до моменту отримання потенційним інвестором додаткових чистих прибутків у цьому році.

$$ПП = 1471826,66 + 1590045,35 + 1734968,79 + 1765514,20 = 6562355,00 \text{ (грн.)}$$

Величина початкових інвестицій  $PV$ , які потенційний інвестор має вкласти для впровадження і комерціалізації науково-технічної розробки

$$PV = k_{инв} \cdot ЗВ, \quad (4.21)$$

де  $k_{инв}$  – коефіцієнт, що враховує витрати інвестора на впровадження науково-технічної розробки та її комерціалізацію, приймаємо  $k_{инв}=2$ ;

$ЗВ$  – загальні витрати на проведення науково-технічної розробки та оформлення її результатів, приймаємо 209524,97 (грн.).

$$PV = k_{инв} \cdot ЗВ = 2 \cdot 209524,97 = 419049,94 \text{ (грн.)}$$

Абсолютний економічний ефект  $E_{абс}$  для потенційного інвестора від можливого впровадження та комерціалізації науково-технічної розробки становитиме

$$E_{abc} = III - PV \quad (4.22)$$

де  $III$  – приведена вартість зростання всіх чистих прибутків від можливого впровадження та комерціалізації науково-технічної розробки, 6562355,00 (грн.);

$PV$  – теперішня вартість початкових інвестицій, 363737,24 (грн.).

$$E_{abc} = III - PV = 6562355,00 - 419049,94 = 6143305,06 \text{ (грн.)}$$

Внутрішня економічна дохідність інвестицій  $E_g$ , які можуть бути вкладені потенційним інвестором у впровадження та комерціалізацію науково-технічної розробки

$$E_g = T_{ж} \sqrt[1 + \frac{E_{abc}}{PV}] - 1, \quad (4.23)$$

де  $E_{abc}$  – абсолютний економічний ефект вкладених інвестицій, 6562355,00 (грн.);

$PV$  – теперішня вартість початкових інвестицій, 363737,24 (грн.);

$T_{ж}$  – життєвий цикл науково-технічної розробки, тобто час від початку її розробки до закінчення отримання позитивних результатів від її впровадження, 4 роки.

$$E_g = T_{ж} \sqrt[1 + \frac{E_{abc}}{PV}] - 1 = (1 + 6143305,06/419049,94)^{1/4} = 1,99.$$

Мінімальна внутрішня економічна дохідність вкладених інвестицій  $\tau_{мін}$

$$\tau_{мін} = d + f, \quad (4.24)$$

де  $d$  – середньозважена ставка за депозитними операціями в комерційних банках; в 2025 році в Україні  $d = 0,11$ ;

$f$  – показник, що характеризує ризикованість вкладення інвестицій, прийmemo 0,35.

$\tau_{\min} = 0,11 + 0,35 = 0,46 < 1,99$  свідчить про те, що внутрішня економічна дохідність інвестицій  $E_g$ , які можуть бути вкладені потенційним інвестором у впровадження та комерціалізацію науково-технічної розробки вища мінімальної внутрішньої дохідності. Тобто інвестувати в науково-дослідну роботу за темою «Інформаційно-вимірювальна система контролю параметрів мікроклімату в підземних транспортних спорудах» доцільно.

Період окупності інвестицій  $T_{ок}$  які можуть бути вкладені потенційним інвестором у впровадження та комерціалізацію науково-технічної розробки

$$T_{ок} = \frac{1}{E_g}, \quad (4.25)$$

де  $E_g$  – внутрішня економічна дохідність вкладених інвестицій.

$$T_{ок} = 1 / 1,99 = 0,5 \text{ р.}$$

$T_{ок} < 3$ -х років, що свідчить про комерційну привабливість науково-технічної розробки і може спонукати потенційного інвестора профінансувати впровадження даної розробки та виведення її на ринок.

#### 4.5 Висновки до розділу

Згідно з результатами проведених досліджень рівень комерційного потенціалу науково-технічної розробки за темою «Інформаційно-вимірювальна система контролю параметрів мікроклімату в підземних транспортних спорудах» становить 38,0 бала, що свідчить про її комерційну значущість та відповідає рівню вище середнього.

Оцінювання за технічними параметрами показало, що відповідно до узагальненого коефіцієнта якості розробка переважає існуючі аналоги приблизно у 2 рази, що підтверджує її технічну конкурентоспроможність та доцільність практичного впровадження.

Розрахований термін окупності інвестицій становить 0,5 року, що є значно меншим за гранично допустиме значення 3 роки. Це свідчить про високу комерційну привабливість науково-технічної розробки та створює передумови для зацікавленості потенційного інвестора у фінансуванні її впровадження і подальшого виведення на ринок.

Таким чином, результати проведених техніко-економічних розрахунків підтверджують економічну доцільність та обґрунтованість виконання науково-дослідної роботи за темою «Інформаційно-вимірювальна система контролю параметрів мікроклімату в підземних транспортних спорудах».

## ВИСНОВКИ

У магістерській роботі вирішено актуальну науково-технічну задачу, що полягає у розробці та обґрунтуванні інформаційно-вимірювальної системи контролю параметрів мікроклімату в підземних транспортних спорудах. Актуальність дослідження зумовлена специфічними умовами експлуатації підземних об'єктів, обмеженим повітрообміном, високими пасажирськими потоками та підвищеними вимогами до безпеки й надійності інженерних систем.

У процесі виконання роботи проведено детальний аналіз особливостей формування мікроклімату в підземних транспортних спорудах та визначено основні параметри, що потребують постійного контролю, а саме: температуру та вологість повітря, концентрації CO<sub>2</sub>, CO, токсичних і вибухонебезпечних газів, рівень запиленості, а також швидкість і напрям повітряних потоків. Показано, що відхилення цих параметрів від нормативних значень може призводити до погіршення самопочуття людей, зниження надійності обладнання та виникнення аварійних ситуацій.

На основі проведеного аналізу нормативної бази та вимог до якості повітря обґрунтовано необхідність інтеграції гранично допустимих концентрацій у структуру інформаційно-вимірювальної системи як базових порогових значень для формування алгоритмів контролю, попередження та аварійного реагування. Встановлено, що використання ГДК дозволяє забезпечити об'єктивну оцінку стану мікроклімату та підвищити рівень безпеки експлуатації підземних споруд.

У роботі розроблено функціональну та структурно-алгоритмічну організацію інформаційно-вимірювальної системи контролю мікроклімату, яка забезпечує безперервний моніторинг параметрів повітряного середовища, автоматизований збір і обробку даних, пріоритетну обробку критичних вимірювальних величин та формування попереджувальних і аварійних сигналів. Запропонована архітектура дозволяє інтегрувати систему з

вентиляційними та диспетчерськими комплексами підземних транспортних об'єктів.

Отримало подальшого розвитку методичний підхід до оцінювання метрологічних характеристик інформаційно-вимірювальної системи, що дало змогу виконати узагальнену оцінку сумарної похибки ІВС з урахуванням похибок окремих сенсорних каналів, алгоритмів обробки вимірювальної інформації та впливу реальних умов експлуатації. Це дозволяє підвищити достовірність результатів вимірювання та обґрунтувати точність функціонування системи в цілому.

Практичне значення роботи полягає в можливості використання отриманих результатів при проектуванні, модернізації та експлуатації систем контролю мікроклімату в метрополітенах, транспортних тунелях, підземних паркінгах та інших підземних інженерних спорудах. Запропоновані технічні та алгоритмічні рішення можуть бути інтегровані в автоматизовані системи вентиляції й безпеки, а також використані в подальших наукових дослідженнях і навчальному процесі.

Таким чином, поставлені в роботі мета та завдання досягнуті, а отримані результати підтверджують доцільність і ефективність застосування інформаційно-вимірювальних систем для комплексного контролю параметрів мікроклімату в підземних транспортних спорудах.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Жуковський С. С., Лабай В. Й. Системи енергопостачання та забезпечення мікроклімату будинків і споруд : навч. посіб. — Львів : Вид-во Львів. політехніки, 2000. — 259 с.
2. Жуковський С. С., Возняк О. Т., Довбуш О. М. Вентилювання приміщень : навч. посіб. — Львів : Вид-во Львів. політехніки, 2007. — 476 с.
3. Возняк О. Т. Мікроклімат будівель і споруд : монографія. — Львів : Львівська політехніка, 2012. — 324 с.
4. Бурячок В. Л., Мельник В. М. Основи метрології та вимірювальної техніки : підручник. — Київ : КНУБА, 2014. — 312 с.
5. Коваль О. П., Попов В. М. Інформаційно-вимірювальні системи : навч. посіб. — Львів : Львівська політехніка, 2018. — 228 с.
6. ДСТУ ISO 7726:2005. Ергономіка теплого середовища. Прилади для вимірювання фізичних величин.
7. ДСТУ EN 13779:2011. Вентиляція нежитлових будівель.
8. ДБН В.2.5-67:2013. Опалення, вентиляція та кондиціонування.
9. Попов В. М., Коваль О. П. Інформаційно-вимірювальні системи контролю параметрів середовища // Вимірювальна техніка та метрологія. — Львів, 2019. — № 80. — С. 34–41.
10. Возняк О. Т., Довбуш О. М. Аналіз параметрів мікроклімату в приміщеннях з примусовою вентиляцією // Вісник НУ «Львівська політехніка». — 2018. — № 899. — С. 112–118.
11. Лабай В. Й., Возняк О. Т. Дослідження повітрообміну в замкнених просторах // Науковий вісник будівництва. — 2017. — № 2. — С. 55–61.
12. Коваль О. П. Метрологічне забезпечення інформаційно-вимірювальних систем // Метрологія та прилади. — 2020. — № 3. — С. 18–24.
13. Попов В. М. Методи оцінки сумарної похибки вимірювальних систем // Український метрологічний журнал. — 2021. — № 2. — С. 9–15.

14. Doebelin E. O., Manik D. N. *Measurement Systems: Application and Design*. — New York : McGraw-Hill, 2011. — 960 p.
15. Bentley J. P. *Principles of Measurement Systems*. — Pearson Education, 2005. — 640 p.
16. Holman J. P. *Experimental Methods for Engineers*. — New York : McGraw-Hill, 2012. — 768 p.
17. Morris A. S., Langari R. *Measurement and Instrumentation: Theory and Application*. — Oxford : Academic Press, 2016. — 672 p.
18. Bishop R. H. *The Mechatronics Handbook*. — Boca Raton : CRC Press, 2018. — 1500 p.
19. Stull R. B. *An Introduction to Boundary Layer Meteorology*. — Dordrecht : Springer, 1988. — 666 p.
20. Awbi H. B. *Ventilation of Buildings*. — London : Taylor & Francis, 2003. — 440 p.
21. Chen Q., Zhao B. Indoor air quality and microclimate control // *Building and Environment*. — 2011. — Vol. 46. — P. 405–412.
22. Gupta P., Lin C. H. Ventilation and air quality in subway systems // *Building and Environment*. — 2017. — Vol. 118. — P. 128–137.
23. Zhang Y., Wang L. Sensor-based indoor air quality monitoring // *Sensors*. — 2019. — Vol. 19(18).
24. Li X., Xu Q. Multi-sensor systems for environmental monitoring // *Measurement*. — 2020. — Vol. 152.
25. Park J. H., Kim D. H. Wireless sensor networks for environmental monitoring // *Sensors*. — 2018. — Vol. 18(4).
26. Brown D., Smith A. Air quality monitoring in underground transport facilities // *Transportation Research Part D*. — 2021. — Vol. 97.
27. Lee S. H., Yoon J. S. Low-power environmental sensing systems // *Sensors and Actuators A*. — 2022. — Vol. 335.
28. Nguyen H., Tran T. Sensor calibration methods for air quality monitoring // *Measurement*. — 2023. — Vol. 208.

29. ISO 7730:2005. Ergonomics of the thermal environment.
30. ISO 16000. Indoor air — Series of standards.
31. ASHRAE Handbook: HVAC Fundamentals. — Atlanta : ASHRAE, 2017.
32. ASHRAE Standard 62.1-2019. Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality.
33. World Health Organization. Air Quality Guidelines. — Geneva : WHO, 2006.
34. Kartalopoulos S. V. Sensor Networks and Sensor Signal Processing. — Hoboken : Wiley, 2013.
35. Wang D., Hoyt R. Environmental Sensor Networks. — Oxford : Elsevier, 2019.
36. Kalantar-Zadeh K. Sensors: An Introductory Course. — New York : Springer, 2013.
37. Fraden J. Handbook of Modern Sensors. — New York : Springer, 2016.
38. Wilson J. S. Sensor Technology Handbook. — Oxford : Elsevier, 2005.
39. Turner J. C. Environmental Measurement and Instrumentation. — Boca Raton : CRC Press, 2014.
40. Liu Z. Air Quality Monitoring Systems. — Singapore : Springer, 2020.
41. Madan S. Smart Sensors and Systems. — Hoboken : Wiley, 2021.
42. McKercher R. Underground Ventilation and Airflow Control. — Cham : Springer, 2018.
43. Heiselberg P. Principles of Hybrid Ventilation. — Aalborg : Aalborg University Press, 2006.
44. Awbi H. B. Indoor Air Quality. — London : Routledge, 2014.
45. Balocco C. Indoor environmental quality monitoring // Energy and Buildings. — 2018. — Vol. 165.

46. Croxford B., Penman J. Measurement of indoor environment parameters // *Building Research & Information*. — 2000. — Vol. 28.

47. В. О. Козловський, О. Й. Лесько, В. В. Кавецький. Методичні вказівки до виконання економічної частини магістерських кваліфікаційних робіт / Уклад. Вінниця : ВНТУ, 2021. – 42 с.

48. Кавецький В. В. Економічне обґрунтування інноваційних рішень: практикум / В. В. Кавецький, В. О. Козловський, І. В. Причепка – Вінниця : ВНТУ, 2016. – 113 с.

Додаток А  
(обов'язковий)

**ІЛЮСТРАТИВНА ЧАСТИНА  
ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНА СИСТЕМА КОНТРОЛЮ  
ПАРАМЕТРІВ МІКРОКЛІМАТУ В ПІДЗЕМНИХ ТРАНСПОРТНИХ  
СПОРУДАХ**

Виконав: студент 2-го курсу, групи КІВТ-24м  
спеціальності 175 – Інформаційно вимірювальні  
технології

(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)

 Луценко В.І.  
(прізвище та ініціали)

Керівник: к.т.н., доцент каф. ІРТС

 Дудатьєв І.А.  
(прізвище та ініціали)

« 15 » 12 2025 р.

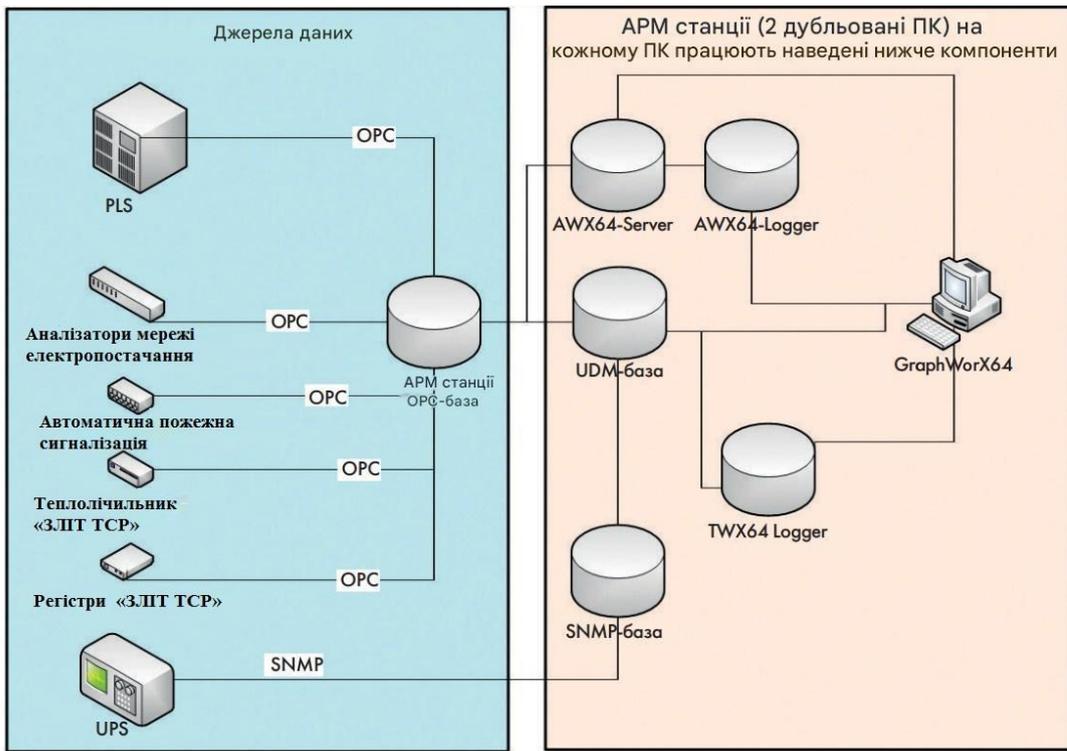


Рисунок 1 – Приклад інформаційної моделі станції метро

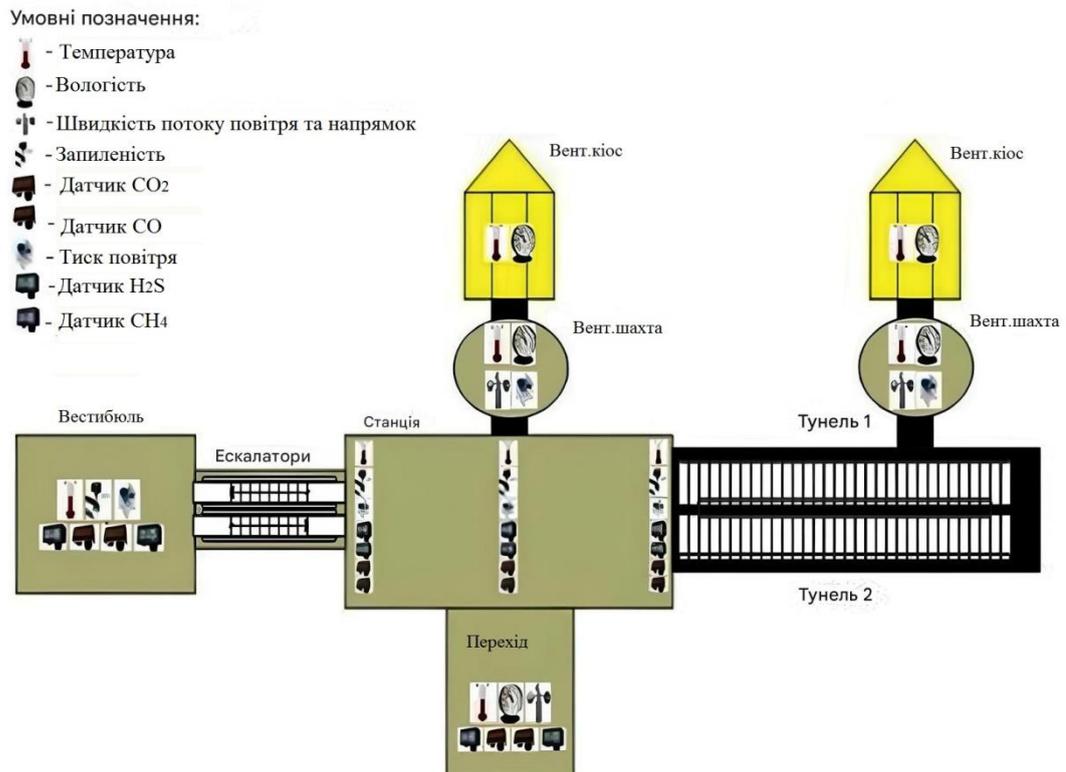


Рисунок 2 – Оснащення станцій метрополітену, вентшахт/венткіосків та вестибюлів приладами контролю мікроклімату

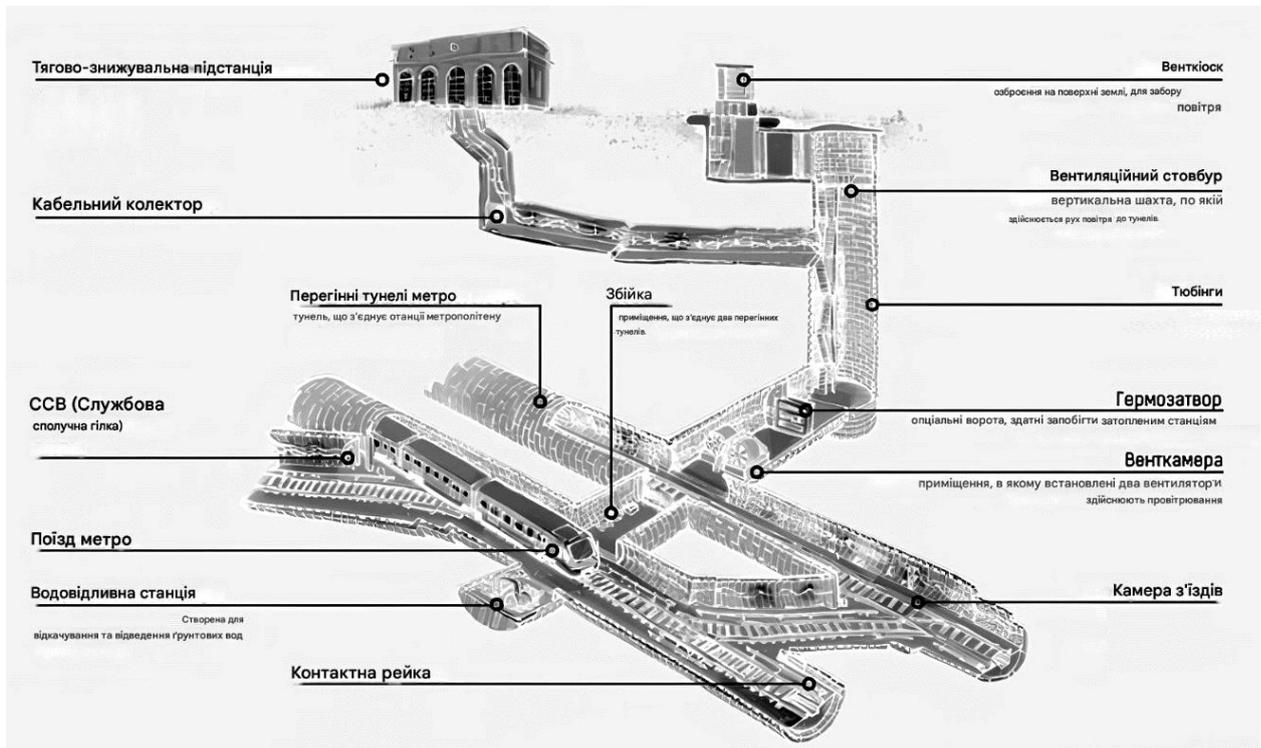


Рисунок 3 – Схематичне зображення станції метро в розрізі

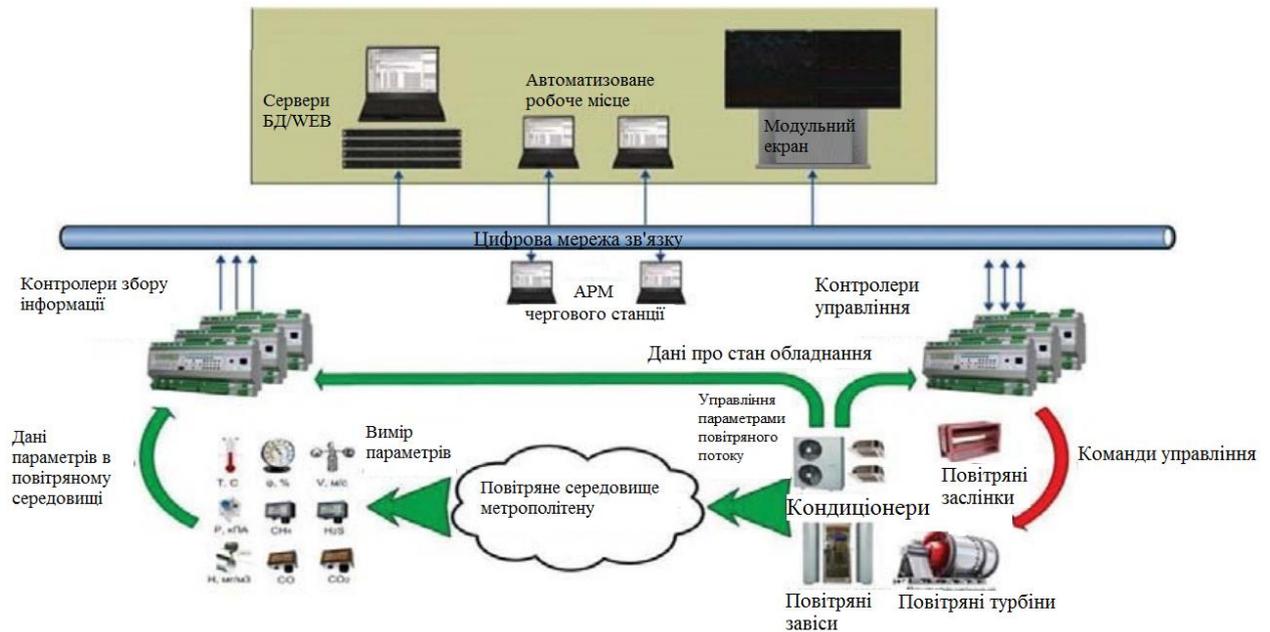


Рисунок 4 – Єдиний центр контролю та управління мікрокліматом метрополітену



Рисунок 5 – Система вентиляції метрополітенів фірми Zitron

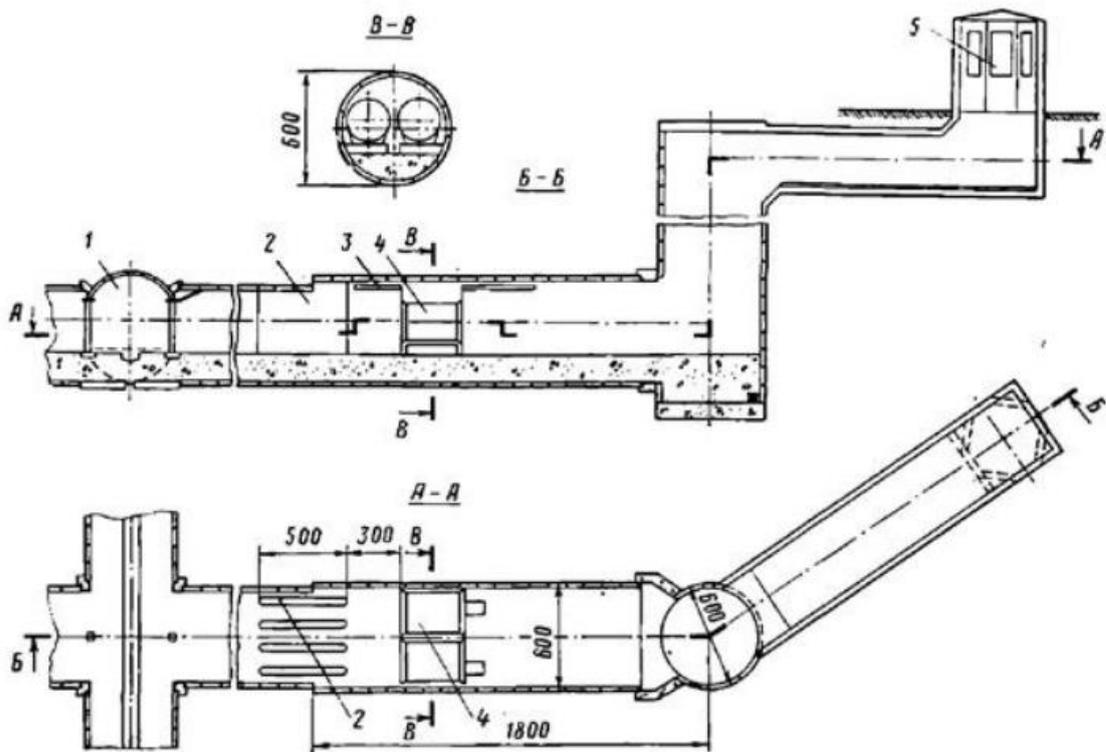


Рисунок 6 – Вентиляційне встановлення на перегоні глибоко закладеної лінії:  
 1 - перегінний тунель; 2 - шумоглушливі перегородки; 3 - монтажні балки; 4 -  
 вентилятори; 5 - вентиляційний кіоск



Рисунок 7 – Вентиляційний кіоск № 5 СБЛ



Рисунок 8 – Вентиляційний кіоск В/К №248 СПЛ

Додаток Б  
(обов'язковий)

**ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ РОБОТИ**  
**ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНА СИСТЕМА КОНТРОЛЮ**  
**ПАРАМЕТРІВ МІКРОКЛІМАТУ В ПІДЗЕМНИХ ТРАНСПОРТНИХ**  
**СПОРУДАХ**

## ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Назва роботи: **«Інформаційно-вимірювальна система контролю параметрів мікроклімату в підземних транспортних спорудах»**

Тип роботи: Магістерська кваліфікаційна робота  
(бакалаврська кваліфікаційна робота / магістерська кваліфікаційна робота)

Підрозділ Кафедра ІРТС  
(кафедра, факультет, навчальна група)

Коефіцієнт подібності текстових запозичень, виявлених у роботі системою StrikePlagiarism 6,04%

Висновок щодо перевірки кваліфікаційної роботи (відмітити потрібне)

- Запозичення, виявлені у роботі, є законними і не містять ознак плагіату, фабрикації, фальсифікації. Роботу прийняти до захисту
- У роботі не виявлено ознак плагіату, фабрикації, фальсифікації, але надмірна кількість текстових запозичень та/або наявність типових розрахунків не дозволяють прийняти рішення про оригінальність та самостійність її виконання. Роботу направити на доопрацювання.
- У роботі виявлено ознаки плагіату та/або текстових маніпуляцій як спроб укриття плагіату, фабрикації, фальсифікації, що суперечить вимогам законодавства та нормам академічної доброчесності. Робота до захисту не приймається.

Експертна комісія:

Припула М.О. – к.т.н., доцент каф. ІРТС  
(прізвище, ініціали, посада)

(підпис)

Осадчук О.В. – д.т.н., професор, зав. каф. ІРТС  
(прізвище, ініціали, посада)

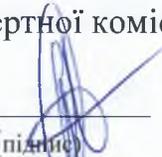
(підпис)

Особа, відповідальна за перевірку   
(підпис)

Семенов А.О.  
(прізвище,

ініціали)

З висновком експертної комісії ознайомлений(-на)

Керівник   
(підпис)

Дудатьєв І.А. – к.т.н., доцент каф. ІРТС  
(прізвище, ініціали, посада)

Здобувач   
(підпис)

Луценко В.І.  
(прізвище, ініціали)

Додаток В  
(довідниковий)

**ФРАГМЕНТ ЛІСТИНГУ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ.  
ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНА СИСТЕМА КОНТРОЛЮ  
ПАРАМЕТРІВ МІКРОКЛІМАТУ В ПІДЗЕМНИХ ТРАНСПОРТНИХ  
СПОРУДАХ**

```

#include <DHT.h>
#include <SoftwareSerial.h>
#include <Adafruit_BMP280.h>

// ===== НАЛАШТУВАННЯ =====
#define DHTPIN 4
#define DHTTYPE DHT22

#define MQ7_PIN 34 // аналоговий вхід
#define ALARM_PIN 2 // світлодіод / реле

// UART для CO2 та пилу
SoftwareSerial co2Serial(16, 17); // RX, TX
SoftwareSerial pmSerial(18, 19);

// ===== ОБ'ЄКТИ =====
DHT dht(DHTPIN, DHTTYPE);
Adafruit_BMP280 bmp;

// ===== ГДК (пороги) =====
const int CO2_LIMIT = 1000; // ppm
const int CO_LIMIT = 50; // ppm (умовно)
const int PM25_LIMIT = 25; // µg/m³

// ===== ЗМІННІ =====
float temperature, humidity, pressure;
int co2_ppm;
int co_raw;
int pm25, pm10;

void setup() {
  Serial.begin(115200);
  co2Serial.begin(9600);
  pmSerial.begin(9600);

  pinMode(ALARM_PIN, OUTPUT);
  digitalWrite(ALARM_PIN, LOW);

  dht.begin();
  bmp.begin(0x76);

  Serial.println("IBC контролю мікроклімату
запущена");
}

void loop() {
  readDHT();
  readBMP();
  readCO2();
  readCO();
  readPM();

  checkLimits();
  sendData();

  delay(2000);
}

// ===== ФУНКЦІЇ =====

void readDHT() {
  temperature = dht.readTemperature();
  humidity = dht.readHumidity();
}

void readBMP() {
  pressure = bmp.readPressure() / 100.0;
}

void readCO2() {
  if (co2Serial.available()) {
    byte response[9];
    co2Serial.readBytes(response, 9);
    co2_ppm = response[2] * 256 + response[3];
  }
}

void readCO() {
  co_raw = analogRead(MQ7_PIN);
}

void readPM() {
  if (pmSerial.available()) {
    uint8_t buffer[32];
    pmSerial.readBytes(buffer, 32);
    pm25 = buffer[12] * 256 + buffer[13];
    pm10 = buffer[14] * 256 + buffer[15];
  }
}

void checkLimits() {
  if (co2_ppm > CO2_LIMIT || co_raw > CO_LIMIT ||
pm25 > PM25_LIMIT) {
    digitalWrite(ALARM_PIN, HIGH);
  } else {
    digitalWrite(ALARM_PIN, LOW);
  }
}

void sendData() {
  Serial.println("----- ДАHI MIKPOKЛIIMATY -----");
  Serial.print("T = "); Serial.print(temperature);
  Serial.println(" °C");
  Serial.print("H = "); Serial.print(humidity);
  Serial.println(" %");
  Serial.print("P = "); Serial.print(pressure);
  Serial.println(" hPa");
  Serial.print("CO2 = "); Serial.print(co2_ppm);
  Serial.println(" ppm");
  Serial.print("CO (raw) = "); Serial.println(co_raw);
  Serial.print("PM2.5 = "); Serial.print(pm25);
  Serial.println(" µg/m³");
  Serial.print("PM10 = "); Serial.print(pm10);
  Serial.println(" µg/m³");
}

```