

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

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Метод та кіберфізична система визначення та моніторингу мікроклімату в підземних спорудах подвійного призначення (укриттях).

Назва теми

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Галузь знань 12 «Інформаційні технології»

Шифр, назва

Спеціальність 123 «Комп'ютерна інженерія»

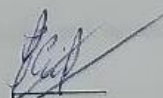
Шифр, назва

Освітня програма «Комп'ютерна інженерія та програмування»

Назва

Шифр КвРКІ 240124.24.01.36 ПЗ

Виконав здобувач II курсу, група КІ2М-24-1



Підпис

Костянтин
СНІЖИНСЬКИЙ

Ініціали, прізвище

Керівник
доцент

канд.-техн. наук,



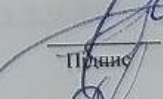
Підпис

Володимир ГРИГА

Ініціали, прізвище

Нормоконтролер

д. техн. наук, професор
Науковий ступінь, учене звання



Підпис

Сергій ЛИСЕНКО

Ініціали, прізвище

До захисту допускаю:
завідувач кафедри КІС
«__» травня 2026 р.



Підпис

Ольга ПАВЛОВА

Ініціали, прізвище

дата

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Кафедра КОМП'ЮТЕРНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ

Рівень вищої освіти ДРУГИЙ (МАГІСТЕРСЬКИЙ)

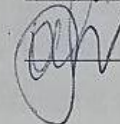
Галузь знань 12 ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

Спеціальність 123 КОМП'ЮТЕРНА ІНЖЕНЕРІЯ

Освітня програма «КОМП'ЮТЕРНА ІНЖЕНЕРІЯ ТА ПРОГРАМУВАННЯ»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувачка кафедри КІС



Ольга ПАВЛОВА

“ 12 ” 01 2026 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Сніжинському Костянтину Віталійовичу

Прізвище, ім'я, по батькові студента

1. Тема проекту (роботи) Метод та кіберфізична система визначення та моніторингу мікроклімату в підземних спорудах подвійного призначення (укриттях).

Керівник проекту (роботи) Грига Володимир Михайлович, к.т.н., доцент.

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

Затверджена наказом ректора університету від 12.01.2026 р. № 6

2. Термін подання здобувачем роботи на кафедру 01.05.2026 р.

3. Вихідні дані до роботи Завдання на кваліфікаційну роботу

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

Аналіз особливостей формування мікроклімату в підземних спорудах подвійного призначення та існуючих підходів його моніторингу

Моделювання кіберфізичної системи визначення та моніторингу мікроклімату в укриттях

Розроблення методу визначення та моніторингу мікроклімату в підземних спорудах

Реалізація кіберфізичної системи моніторингу та аналіз результатів експериментів

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

6. Консультанти розділів кваліфікаційної роботи

6. Консультанти розділів кваліфікаційної роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання « 12 » 01 2026 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№з/п	Назва етапів (розділів) кваліфікаційної роботи магістра	Термін виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1	Вибір напрямку дослідження та узгодження тематики КвРМ з керівником	12.01.2026	виконано
2	Ознайомлення з предметною областю; формулювання мети та задач дослідження; визначення об'єкта та предмета дослідження	12.01.2026	виконано
3	Робота над розділом 1 – аналіз відомих моделей, методів за темою; постановка задачі	20.01.2026	виконано
4	Робота над розділом 2 – розробка моделей для вирішення поставленої задачі	01.02.2026	виконано
5	Робота над науковою статтею	01.03.2026	виконано
6	Робота над розділом 3 – розробка методів для вирішення поставленої задачі	15.03.2026	виконано
7	Робота над розділом 4 – проектування та розробка ПЗ для вирішення поставленої задачі, експериментальна частина	01.04.206	виконано
8	Оформлення пояснювальної записки згідно вимог	18.04.2026	виконано
9	Попередній захист ДРМ	29.04.2026	виконано
10	Захист ДРМ на засіданні ЕК	До 15.05.2026	

Здобувач

Підпис

Костянтин СНІЖИНСЬКИЙ
Імя, ПРІЗВИЩЕ

Керівник кваліфікаційної роботи

Підпис

Володимир ГРИГА
Імя, ПРІЗВИЩЕ

РЕФЕРАТ

Тема кваліфікаційної роботи магістра: Метод та кіберфізична система визначення та моніторингу мікроклімату в підземних спорудах подвійного призначення (укриттях).

Автор роботи: Сніжинський Костянтин Віталійович.

Керівник роботи: Грига Володимир Михайлович.

Пояснювальна записка: 81 с., 16 рис., 3 табл., 4 дод., 81 джерел.

МЕТОД, КІБЕРФІЗИЧНА СИСТЕМА, МОНІТОРИНГ МІКРОКЛІМАТУ, ПІДЗЕМНІ СПОРУДИ ПОДВІЙНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

Об'єктом дослідження є процес формування та контролю параметрів мікроклімату в підземних спорудах подвійного призначення.

Предметом дослідження є методи вимірювання, обробки та аналізу параметрів мікроклімату в підземних спорудах подвійного призначення, зокрема методи фільтрації даних, адаптивного вимірювання, а також алгоритми автоматичного керування умовами повітряного середовища, що включають використання адаптивної зміни частоти вимірювань та формування керуючих впливів на вентиляцію та обігрів.

Метою кваліфікаційної роботи магістра є підвищення ефективності контролю параметрів мікроклімату в підземних спорудах подвійного призначення шляхом розроблення методу та кіберфізичної системи моніторингу, здатної здійснювати збір, оброблення, аналіз і передавання даних про стан внутрішнього середовища, та забезпечувати своєчасне виявлення відхилень, а також формувати керуючі впливи на вентиляцію та обігрів.

Для розв'язання поставлених задач використовувалися основні положення системного аналізу, методи моделювання кіберфізичних систем, методи цифрового оброблення даних, методи фільтрації та усереднення вимірювань, а також засоби мікроконтролерної техніки та бездротової передачі даних.

Наукова новизна отриманих результатів:

1. Набув подальшого розвитку метод моніторингу мікроклімату в підземних спорудах подвійного призначення, який на відміну від відомих підходів враховує комплексний контроль температури, відносної вологості та якості повітря, враховує наявність випадкових шумів та нестабільність вимірювань, що досягається шляхом використання процедур фільтрації, а також реалізує адаптивну зміну інтервалу вимірювання залежно від стану середовища, що дозволяє підвищити точність контролю параметрів та знизити енергоспоживання системи.

2. Удосконалено метод формування керуючих впливів у кіберфізичній системі моніторингу мікроклімату, який, на відміну від існуючих рішень, забезпечує автоматичне керування вентиляцією та обігрівом на основі аналізу параметрів середовища, що дозволяє підвищити оперативність реагування та стабільність підтримання допустимих умов мікроклімату.

Практична цінність отриманих результатів полягає в тому, що в результаті виконаного дослідження розроблено метод адаптивного моніторингу мікроклімату з використанням змінного інтервалу вимірювань та фільтрації даних, а також апаратно-програмну реалізацію кіберфізичної системи моніторингу мікроклімату, яка може бути використана для безперервного контролю параметрів повітряного середовища в укриттях. Розроблена система забезпечує своєчасне виявлення небезпечних відхилень, можливість дистанційного моніторингу та автоматичне формування керуючих дій для підтримання допустимих умов перебування людей.

У першому розділі проведено аналіз особливостей мікроклімату підземних споруд подвійного призначення, розглянуто нормативні вимоги до параметрів повітряного середовища, а також досліджено існуючі засоби контролю температури, вологості та якості повітря в укриттях. Обґрунтовано актуальність застосування автоматизованих систем моніторингу мікроклімату.

У другому розділі сформовано модель кіберфізичної системи визначення та моніторингу мікроклімату в підземних спорудах подвійного призначення, виконано формалізацію основних параметрів внутрішнього середовища та розроблено структуру взаємодії сенсорних, обчислювальних і виконавчих компонентів. Запропоновано підхід до оцінювання стану мікроклімату та модель

прийняття рішень для автоматичного керування вентиляцією й обігрівом залежно від поточних умов середовища.

У третьому розділі розроблено метод збору, обробки та аналізу даних сенсорів, реалізовано алгоритми фільтрації вимірювань, адаптивної зміни інтервалу опитування датчиків та логіку автоматичного формування керуючих впливів для вентиляції й обігріву.

У четвертому розділі виконано програмно-технічну реалізацію розробленої системи, проведено експериментальні дослідження її функціонування, проаналізовано результати роботи та підтверджено ефективність запропонованого рішення для моніторингу мікроклімату в підземних спорудах подвійного призначення.

ЗМІСТ

Скорочення та умовні позначки	5
Вступ.....	6
1 Аналіз особливостей формування мікроклімату в підземних спорудах подвійного призначення та існуючих підходів його моніторингу	9
1.1 Особливості формування мікроклімату в підземних спорудах подвійного призначення	9
1.2 Нормативні вимоги до параметрів мікроклімату в укриттях	14
1.3 Огляд існуючих систем моніторингу мікроклімату	19
1.4 Постановка задачі дослідження.....	27
1.5 Висновки	30
2 Моделювання кіберфізичної системи визначення та моніторингу мікроклімату в укриття.....	32
2.1 Формалізований опис параметрів мікроклімату як об'єкта моніторингу.....	32
2.2 Модель кіберфізичної системи визначення та моніторингу мікроклімату.....	35
2.3 Структурна модель взаємодії сенсорних, обчислювальних і виконавчих компонентів системи.....	38
2.4 Модель збору, обробки та оцінювання даних.....	41
2.5 Модель оцінки і коригування параметрів мікроклімату з адаптивним алгоритмом вимірювань	43
2.6 Модель управління вентиляцією та обігрівом	45
2.7 Висновки	48
3 Розроблення методу визначення та моніторингу мікроклімату в підземних спорудах	50
3.1 Метод збору та попередньої обробки даних зі сенсорів.....	50
3.2 Метод фільтрації та підвищення достовірності вимірювань	54
3.3 Адаптивний метод вимірювання параметрів мікроклімату	60
3.4 Метод формування керуючих впливів на вентиляцію та обігрів	62
3.5 Висновки	64

4 Реалізація кіберфізичної системи моніторингу та аналіз результатів експериментів	65
4.1 Апаратна реалізація системи моніторингу мікроклімату	65
4.2 Алгоритм функціонування кіберфізичної системи	69
4.3 Програмна реалізація системи моніторингу мікроклімату.....	71
4.4 Хмарний моніторинг та передача даних.....	76
4.5 Методика проведення експериментальних досліджень.....	77
4.6 Аналіз результатів роботи системи	80
4.7 Висновки	83
Висновки	85
Перелік джерел посилань	87
Додаток А Копія тез доповіді у науково-практичному видані.....	97
Додаток Б Копія тез доповіді у науково-практичному видані	98
Додаток В Презентація до захисту кваліфікаційної роботи	100
Додаток Г Лістинг програмного забезпечення моніторингу мікроклімату	109

СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ

IoT – (Internet of Things) – Інтернет речей

CO – Чадний газ

CO₂ – Вуглекислий газ

КФС – Кіберфізична система

ESP32 – Мікроконтролер

I2C/UART/SPI/PWM – Протоколи обміну між пристроями: цифрові інтерфейси

DHT22/AM2302 – Датчик температури і вологості

MICS-5524 – Датчик якості повітря

MH-Z19B – Датчик вуглекислого газу

СРЧ – Система реального часу

HTTP – (HyperText Transfer Protocol) — протокол передачі гіпертексту

ВСТУП

У сучасних умовах зростання техногенних ризиків, урбанізації та воєнних загроз особливої актуальності набуває питання забезпечення безпечних умов перебування людей у захисних спорудах цивільного захисту та підземних спорудах подвійного призначення. Під час тривалого перебування людей у замкнених приміщеннях відбувається зміна параметрів повітряного середовища, зокрема підвищення температури, вологості, зниження якості повітря та накопичення шкідливих домішок. Це негативно впливає на самопочуття людей, працездатність та рівень безпеки [1-2].

Традиційні засоби контролю мікроклімату переважно базуються на використанні окремих вимірювальних приладів або ручному спостереженні, що не забезпечує безперервного моніторингу, своєчасного виявлення критичних змін та автоматичного реагування на погіршення умов середовища. У зв'язку з цим перспективним напрямом є впровадження кіберфізичних систем, які поєднують сенсорні пристрої, обчислювальні модулі, канали передачі даних та виконавчі механізми керування [4].

Кіберфізичні системи моніторингу дозволяють здійснювати збір та аналіз даних у режимі реального часу, реалізовувати віддалений контроль параметрів середовища, формувати попередження про небезпечні ситуації та автоматично керувати вентиляцією й обігрівом приміщень. Особливого значення набуває створення енергоефективних та недорогих рішень, здатних працювати автономно в умовах можливих перебоїв електроживлення [5].

Актуальність роботи полягає в розробці методу адаптивного моніторингу мікроклімату з використанням змінного інтервалу вимірювань, та кіберфізичної системи моніторингу мікроклімату в підземних спорудах подвійного призначення з функціями автоматизованого контролю, передачі даних та керування виконавчими механізмами.

Метою кваліфікаційної роботи магістра є підвищення ефективності контролю та підтримання нормативних параметрів мікроклімату в підземних

спорудах подвійного призначення шляхом розробки методу та кіберфізичної системи автоматизованого моніторингу.

Поставлена мета досягається розв'язанням таких основних завдань:

- проаналізувати існуючі методи та засоби контролю параметрів мікроклімату в укриттях і підземних спорудах;
- дослідити сучасні підходи до побудови кіберфізичних систем моніторингу;
- розробити структурну схему кіберфізичної системи моніторингу мікроклімату;
- розробити алгоритми збору, обробки та фільтрації даних сенсорів;
- реалізувати метод адаптивної зміни інтервалу вимірювань параметрів мікроклімату залежно від стану середовища, що забезпечує зниження енергоспоживання системи;
- реалізувати автоматичне керування вентиляцією та обігрівом залежно від стану середовища;
- провести експериментальні дослідження працездатності та ефективності запропонованої системи.

Об'єктом дослідження є процес контролю та підтримання параметрів мікроклімату в підземних спорудах подвійного призначення.

Предметом дослідження є методи, алгоритми та технічні засоби побудови кіберфізичної системи моніторингу мікроклімату в укриттях.

Наукова новизна отриманих результатів:

1. Набув подальшого розвитку метод моніторингу мікроклімату в підземних спорудах подвійного призначення, який на відміну від відомих підходів враховує комплексний контроль температури, відносної вологості та якості повітря, враховує наявність випадкових шумів та нестабільність вимірювань, що досягається шляхом використання процедур фільтрації, а також реалізує адаптивну зміну інтервалу вимірювання залежно від стану середовища, що дозволяє підвищити точність контролю параметрів та знизити енергоспоживання системи.

2. Удосконалено метод формування керуючих впливів у кіберфізичній системі моніторингу мікроклімату, який, на відміну від існуючих рішень, забезпечує автоматичне керування вентиляцією та обігрівом на основі аналізу параметрів середовища, що дозволяє підвищити оперативність реагування та стабільність підтримання допустимих умов мікроклімату.

Практична цінність отриманих результатів полягає в тому, що в результаті виконаного дослідження розроблено метод адаптивного моніторингу мікроклімату з використанням змінного інтервалу вимірювань та фільтрації даних, а також апаратно-програмну реалізацію кіберфізичної системи моніторингу мікроклімату, яка може бути використана для безперервного контролю параметрів повітряного середовища в укриттях. Розроблена система забезпечує своєчасне виявлення небезпечних відхилень, можливість дистанційного моніторингу та автоматичне формування керуючих дій для підтримання допустимих умов перебування людей.

Для розв'язання поставлених задач використовувалися методи системного аналізу, математичного моделювання, цифрової обробки даних, програмування мікроконтролерних систем та експериментальних досліджень.

За темою кваліфікаційної роботи опубліковані тези у Збірнику матеріалів 17ї науково-технічної конференції «Перспективні мережеві та комп'ютерні технології» ПерСик 2026 23 квітня 2026, Харків, Україна [80]. та у збірнику матеріалів VII Міжнародної науково-практичної конференції молодих вчених, аспірантів і студентів «Сучасні інформаційні технології та системи в управлінні» 28-29 квітня 2026 р., Київ, Україна. [81].

1 АНАЛІЗ ОСОБЛИВОСТЕЙ ФОРМУВАННЯ МІКРОКЛІМАТУ В ПІДЗЕМНИХ СПОРУДАХ ПОДВІЙНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ ТА ІСНУЮЧИХ ПІДХОДІВ ЙОГО МОНІТОРИНГУ

1.1 Особливості формування мікроклімату в підземних спорудах подвійного призначення

Підземні споруди подвійного призначення посідають важливе місце в системі цивільного захисту населення, оскільки в умовах надзвичайних ситуацій вони забезпечують можливість тимчасового або тривалого укриття людей. До таких споруд належать підземні переходи, станції метрополітену, підземні паркінги, підвали та цокольні поверхи громадських і житлових будівель, які в мирний час використовуються за основним функціональним призначенням, а у випадку виникнення воєнної, техногенної чи іншої загрози можуть бути пристосовані для перебування населення. У сучасних умовах такі споруди розглядаються не лише як елементи інженерного захисту, а і як середовище, у якому люди повинні мати можливість перебувати без істотної загрози для здоров'я впродовж певного проміжку часу.

Ефективність функціонування підземної споруди подвійного призначення визначається не тільки рівнем її захисних властивостей, міцністю конструкцій і стійкістю до зовнішніх впливів. Не менш важливим чинником є стан внутрішнього середовища, оскільки навіть за наявності достатнього конструктивного захисту погіршення параметрів повітряного середовища може істотно знизити придатність споруди до використання як укриття. У зв'язку з цим питання формування, оцінювання та підтримання належного мікроклімату в підземних спорудах подвійного призначення набуває особливого значення [2-3].

Мікроклімат підземної споруди являє собою сукупність фізичних параметрів повітряного середовища, які формуються в межах замкнутого або частково замкнутого простору і визначають умови перебування людей. До основних параметрів мікроклімату належать температура повітря, відносна вологість, швидкість руху повітря, а також показники якості повітряного середовища. У більш

вужькому прикладному значенні для задач моніторингу мікроклімату найбільш інформативними вважаються температура, вологість та показники забруднення повітря, зокрема концентрація вуглекислого газу, чадного газу, летких органічних сполук і дрібнодисперсного пилу. Саме ці параметри у найбільшій мірі відображають стан середовища, в якому перебувають люди, і можуть бути використані як інформативна основа для прийняття рішень щодо роботи вентиляції, обігріву чи інших допоміжних систем.

Особливість підземних споруд подвійного призначення полягає в тому, що їх внутрішній мікроклімат формується під впливом специфічних умов експлуатації. На відміну від наземних будівель, де істотний вплив мають сонячна радіація, природна вентиляція через віконні та дверні отвори, а також більш інтенсивний теплообмін із зовнішнім повітрям, у підземних спорудах ці чинники або значно послаблені, або майже відсутні. Натомість суттєву роль відіграють властивості ґрунтового середовища, теплова інерційність огорожувальних конструкцій, стан систем вентиляції, ступінь герметизації приміщення та кількість людей, які одночасно перебувають усередині [4].

Підземне розташування споруди зумовлює відносну стабільність температурного режиму, оскільки ґрунт виконує функцію природного теплоакumuлюючого середовища. Це сприяє зменшенню різких коливань температури впродовж доби та сезону. Разом з тим така стабільність не означає автоматичного забезпечення комфортних або навіть допустимих умов. У разі тривалого перебування людей у споруді, роботи освітлення, електрообладнання, систем зв'язку або вентиляції відбувається накопичення тепла в обмеженому просторі. Якщо повітрообмін є недостатнім, температура повітря може поступово підвищуватися, а надлишкове тепло не відводиться в достатньому обсязі. Це створює передумови для перегрівання внутрішнього середовища навіть у тих випадках, коли зовнішня температура є відносно низькою.

Температурний режим у підземних укриттях формується внаслідок одночасної дії кількох чинників. По-перше, на нього впливає природна температура ґрунту, яка залежить від глибини залягання споруди та кліматичних

умов місцевості. По-друге, значний вплив має антропогенне тепловиділення, оскільки кожна людина є постійним джерелом тепла. За умов великої щільності розміщення людей сумарний тепловий потік стає відчутним і може спричиняти помітне підвищення температури повітря. По-третє, внутрішні теплові надходження формуються внаслідок роботи електричного освітлення, інформаційного обладнання, зарядних пристроїв, електродвигунів вентиляторів та інших інженерних засобів. Усе це у сукупності створює умови, за яких підтримання допустимої температури без належної системи контролю та регулювання стає складним завданням [5-8].

Підвищена температура в умовах обмеженого простору негативно впливає на самопочуття людей. Вона може спричиняти прискорену втому, погіршення концентрації уваги, головний біль, дискомфорт і загальне зниження працездатності. Для осіб похилого віку, дітей або людей із хронічними захворюваннями надмірне підвищення температури є ще більш небажаним. Водночас занадто низька температура також небезпечна, особливо під час тривалого перебування, оскільки призводить до переохолодження та зниження рівня фізіологічної стійкості організму. Отже, температурний режим у підземному укритті є одним із базових параметрів, який повинен контролюватися безперервно.

Не менш важливим параметром мікроклімату є відносна вологість повітря. У підземних спорудах її значення визначається поєднанням природної вологості ґрунту, стану гідроізоляції конструкцій, наявності або відсутності конденсаційних процесів, а також вологоутворенням унаслідок життєдіяльності людей. Під час перебування в укритті люди виділяють вологу в процесі дихання, потовиділення та інших фізіологічних процесів, і в умовах недостатньої вентиляції це призводить до поступового зростання вологості повітря. Якщо при цьому температура внутрішніх поверхонь стін або перекриттів є нижчою за температуру повітря, виникають умови для утворення конденсату.

Підвищена вологість є небажаною з кількох причин. Передусім вона створює відчуття задухи та посилює негативний вплив підвищеної температури на людину. Крім того, надмірна вологість сприяє розвитку грибків, плісняви та інших

мікроорганізмів на поверхнях конструкцій, що погіршує санітарно-гігієнічний стан споруди. Зволоження конструктивних елементів також знижує їх експлуатаційну надійність, сприяє корозії металевих частин, погіршує стан оздоблювальних матеріалів і в довгостроковій перспективі може призводити до поступового руйнування елементів споруди. Таким чином, контроль вологості повітря в укриттях має не лише гігієнічне, а й конструктивно-експлуатаційне значення.

Суттєвою складовою мікроклімату є якість повітряного середовища. У замкненому просторі підземної споруди за недостатнього повітрообміну відбувається накопичення вуглекислого газу, який є природним продуктом дихання людини. Сам по собі CO_2 не належить до високотоксичних речовин у малих концентраціях, однак його підвищений вміст є важливим індикатором недостатньої вентиляції та погіршення загального стану повітря. Зростання концентрації CO_2 супроводжується відчуттям нестачі свіжого повітря, сонливістю, головним болем, зниженням когнітивної активності та погіршенням загального самопочуття. У поєднанні з високою температурою і вологістю це формує несприятливе середовище для тривалого перебування.

Окрім вуглекислого газу, у повітрі підземного укриття можуть накопичуватися й інші небезпечні або небажані домішки. До них належить чадний газ, який може утворюватися внаслідок неповного згоряння пального, роботи генераторів, проникнення вихлопних газів або інших аварійних ситуацій. Чадний газ є особливо небезпечним через відсутність вираженого запаху та високу токсичність. Також у повітрі можуть міститися леткі органічні сполуки, джерелами яких є будівельні матеріали, фарби, герметики, електронне обладнання та інші матеріали внутрішнього середовища. Додаткову небезпеку становить дрібнодисперсний пил, який може проникати ззовні, підніматися з поверхонь у процесі переміщення людей або накопичуватися внаслідок недостатнього очищення повітря.

Якість повітря в підземній споруді залежить не лише від кількості людей, а й від організації вентиляції. За наявності ефективного повітрообміну надлишкове тепло, волога та газові домішки відводяться із приміщення, а свіже повітря

подається в обсягах, достатніх для підтримання допустимих умов. У разі недостатньої вентиляції або порушення її роботи погіршення параметрів повітряного середовища може відбуватися досить швидко. Саме тому для підземних споруд подвійного призначення особливого значення набуває постійний контроль параметрів внутрішнього середовища, а не періодичні вимірювання вручну [9-15].

Важливий вплив на мікроклімат мають конструктивні особливості споруди. Підземні приміщення, як правило, формуються із масивних бетонних або залізобетонних конструкцій, які характеризуються значною теплоємністю та інерційністю. Це дозволяє підтримувати відносно стабільний температурний режим, однак одночасно сприяє накопиченню вологи у конструкціях, особливо в разі порушення гідроізоляції або неефективного відведення конденсату. Таким чином, стан огорожувальних конструкцій безпосередньо впливає на мікроклімат і повинен враховуватися при оцінюванні умов експлуатації підземної споруди.

Окремим фактором, який визначає динаміку зміни мікроклімату, є щільність розміщення людей у приміщенні. Чим більше осіб одночасно перебуває в укритті, тим інтенсивніше відбувається накопичення тепла, вологи та вуглекислого газу. У невеликих приміщеннях або за обмежених можливостей повітрообміну це може призводити до швидкого виходу параметрів мікроклімату за допустимі межі. При цьому важливо враховувати, що зміни відбуваються не завжди рівномірно по всьому об'єму приміщення. У різних зонах укриття можуть формуватися локальні відмінності температури, вологості та якості повітря, що створює додаткові труднощі для підтримання однорідного середовища.

Стан мікроклімату впливає не лише на фізичний стан людей, а й на їх психоемоційну стійкість. За підвищеної температури, високої вологості, нестачі свіжого повітря та появи відчуття задухи психологічне напруження в замкнутому просторі посилюється. Це особливо важливо в умовах, коли люди перебувають в укритті під час повітряної тривоги або іншої надзвичайної ситуації. Наявність дискомфортного мікроклімату може погіршувати психологічний стан, провокувати тривожність, дратівливість та ускладнювати перебування великої кількості осіб у

спільному обмеженому просторі.

Таким чином, мікроклімат підземних споруд подвійного призначення формується під впливом сукупності взаємопов'язаних чинників: геотермічних умов, конструктивних характеристик споруди, режиму вентиляції, тепловиділення від людей і обладнання, вологоутворення, а також накопичення газових домішок і пилу. На відміну від звичайних наземних приміщень, у підземних укриттях порушення допустимих параметрів внутрішнього середовища може відбуватися швидше та мати більш виражений вплив на стан людей через замкнутість простору та обмеженість природного повітрообміну.

У зв'язку з цим забезпечення належного мікроклімату в підземних спорудах подвійного призначення потребує постійного контролю температури, відносної вологості та показників якості повітряного середовища. Саме це зумовлює доцільність застосування автоматизованих та інтелектуальних систем моніторингу, здатних у реальному часі виявляти небезпечні зміни параметрів, накопичувати історію спостережень та формувати керуючі впливи для підтримання допустимих умов перебування людей в укритті [16-21].

1.2 Нормативні вимоги до параметрів мікроклімату в укриттях

Забезпечення належного мікроклімату в підземних спорудах подвійного призначення має ґрунтуватися не лише на технічних можливостях систем вентиляції, обігріву чи моніторингу, а й на чинних нормативних вимогах, які регламентують допустимі параметри внутрішнього середовища. Саме нормативна база визначає межі, в яких параметри повітряного середовища вважаються безпечними для перебування людей, а також задає орієнтири для проєктування інженерних систем і побудови алгоритмів контролю мікроклімату.

У підземних спорудах подвійного призначення, що використовуються як укриття, параметри мікроклімату мають особливе значення, оскільки люди можуть перебувати в них не лише короткочасно, а й упродовж тривалого періоду часу. За таких умов температура, вологість і якість повітря безпосередньо впливають на

фізичний стан, працездатність, психоемоційний комфорт та загальний рівень безпеки. У разі відхилення цих параметрів від допустимих меж створюються передумови для погіршення самопочуття людей, а в окремих випадках – і для виникнення загрози здоров'ю.

Нормативне регулювання параметрів мікроклімату в Україні здійснюється на основі державних будівельних норм, санітарних правил і стандартів, які визначають вимоги до внутрішнього повітряного середовища приміщень різного призначення. Для підземних укриттів особливе значення мають документи, що регламентують параметри опалення, вентиляції, кондиціонування, а також загальні вимоги до експлуатації захисних споруд цивільного захисту.

Одним із базових нормативних документів у цій сфері є ДБН В.2.5-67:2013 “Опалення, вентиляція та кондиціонування”. Цей документ встановлює загальні вимоги до проектування систем забезпечення мікроклімату в будівлях і спорудах, а також визначає підходи до нормування температури, вологості та повітрообміну залежно від функціонального призначення приміщень. Хоча документ не орієнтований виключно на укриття, його положення є важливою основою для розроблення технічних рішень щодо підтримання параметрів внутрішнього середовища у допустимих межах [23-26].

Для підземних споруд подвійного призначення, до яких належать станції метрополітену, підземні переходи, паркінги та інші об'єкти, важливе значення мають також положення ДБН В.2.3-7:2018 “Метрополітени”, оскільки в ньому встановлюються вимоги до параметрів внутрішнього повітря в підземних приміщеннях транспортного та громадського призначення. З урахуванням специфіки таких споруд нормативні вимоги формулюються окремо для теплого та холодного періодів року.

У теплий період року температура повітря в підземних приміщеннях не повинна бути надмірно вищою за розрахункову зовнішню температуру. Такий підхід пояснюється тим, що підземні споруди, незважаючи на часткову термічну стабільність, у разі значного скупчення людей і недостатньої вентиляції можуть перегріватися. Саме тому нормативи встановлюють верхні межі температури,

перевищення яких є небажаним і потребує коригувальних дій з боку інженерних систем. У практичному відношенні це означає, що система моніторингу мікроклімату повинна не лише фіксувати поточну температуру, а й оцінювати, наскільки вона наближається до допустимого максимального значення.

У холодний період року основна вимога полягає в недопущенні надмірного зниження температури повітря в укритті яка не повина знижуватися нижче $+10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Для підземних споруд це має особливу важливість, оскільки тривале перебування людей за низької температури може спричинити переохолодження, зниження працездатності та погіршення загального фізіологічного стану. У зв'язку з цим нормативна база визначає мінімально допустимі значення температури, які повинні підтримуватися в укритті навіть за несприятливих зовнішніх умов. Це створює підґрунтя для використання систем обігріву як одного з елементів забезпечення належного мікроклімату [27].

Другим важливим параметром є відносна вологість повітря. У нормативних документах вона розглядається як показник, що суттєво впливає на комфортність і санітарний стан приміщення. Для підземних споруд контроль вологості має особливе значення, оскільки їх конструктивні особливості сприяють накопиченню вологи, утворенню конденсату та виникненню сприятливих умов для розвитку грибків і плісняви. Підвищена відносна вологість повітря в укриттях також ускладнює теплообмін організму людини з навколишнім середовищем і посилює негативний вплив підвищеної температури. Саме тому в межах проектування та експлуатації укриттів важливо дотримуватися нормативно допустимих значень цього параметра та забезпечувати його постійний контроль [28-30].

Крім температури та вологості, значну роль у нормативному забезпеченні відіграють показники якості повітря. Хоча не всі документи безпосередньо встановлюють однакові норми для підземних укриттів, загальні санітарні вимоги орієнтують на необхідність контролю концентрації вуглекислого газу, чадного газу, інших шкідливих домішок і газів. У практичному значенні це означає, що система моніторингу повинна бути орієнтована не лише на класичні параметри мікроклімату, а й на контроль газового складу повітряного середовища. Особливо

це актуально в умовах герметичних або напівгерметичних споруд, де накопичення продуктів дихання та домішок відбувається інтенсивніше [31-33].

Окреме значення мають санітарні норми та стандарти, що регламентують гігієнічні вимоги до параметрів повітряного середовища. Зокрема, ДСанПіН 2.2.4-171-10 “Гігієнічні вимоги до мікроклімату виробничих приміщень” містить підходи до оцінювання температури, вологості та швидкості руху повітря залежно від умов перебування людини. Попри те, що документ безпосередньо орієнтований на виробничі приміщення, його положення можуть бути використані як додатковий орієнтир при аналізі допустимих параметрів мікроклімату в укриттях, особливо в частині оцінювання впливу метеорологічних факторів на організм людини [32].

Для загального визначення параметрів внутрішнього середовища важливим є також ДСТУ 30494-2011, який регламентує параметри мікроклімату в житлових і громадських будівлях. У ньому використовується поділ на оптимальні та допустимі параметри мікроклімату. Такий підхід є корисним і для укриттів, хоча в умовах надзвичайної ситуації пріоритетним є насамперед забезпечення допустимих, а не обов’язково оптимальних умов. Для підземних споруд подвійного призначення саме поняття допустимих параметрів має визначальне значення, оскільки головним завданням є гарантування безпечного перебування людей і недопущення критичних відхилень стану середовища.

Наведемо допустимі контрольовані показники для моніторингу мікроклімату підземних споруд подвійного призначення (таб. 1.1).

Таблиця 1.1 – Допустимі межі показників мікроклімату

Контрольований параметр	Допустимий діапазон
Температура	10-26°C
Відносна вологість повітря	40-60%.
Вуглекислий газ (CO ₂)	1000 ppm
Чадний газ (CO)	100-200 ppm
Газ метан (CH ₄) та бутан	1000 ppm

У міжнародній практиці для оцінювання теплового комфорту широко застосовується стандарт ISO 7730, на основі якого введено показники PMV і PPD. Ці показники дозволяють кількісно оцінити ступінь теплового комфорту та прогнозовану частку людей, незадоволених умовами мікроклімату. Для підземних укриттів такі підходи можуть бути корисними при оцінюванні комфортності умов перебування, однак у практичному застосуванні для кіберфізичної системи моніторингу більш доцільним є використання простіших і більш надійних критеріїв – граничних допустимих меж температури, вологості та якості повітря.

З огляду на це, при розробленні системи моніторингу мікроклімату в підземних спорудах подвійного призначення нормативні вимоги доцільно інтерпретувати як порогові значення для контролю середовища. Тобто кожному контрольованому параметру має відповідати певний допустимий інтервал. Якщо фактичне значення температури, вологості чи показника якості повітря виходить за встановлені межі, система повинна фіксувати це як відхилення від нормативного стану та ініціювати відповідну реакцію. Саме такий підхід є найбільш придатним для побудови алгоритмів автоматизованого контролю.

Слід зазначити, що для підземних споруд подвійного призначення важливо не лише разово перевіряти відповідність параметрів нормативним значенням, а й відстежувати їх зміну в часі. Навіть якщо поточний стан ще не вийшов за межі допустимого, наявність тенденції до погіршення, наприклад поступове зростання температури або концентрації CO₂, повинна враховуватися системою моніторингу. Саме тому нормативні межі мають використовуватися не тільки як засіб фіксації вже наявної проблеми, а і як основа для попереджувального аналізу та формування керуючих впливів.

Таким чином, нормативні вимоги до параметрів мікроклімату в укриттях формують базу для проектування, налаштування та функціонування кіберфізичної системи моніторингу. Вони дозволяють визначити допустимі межі температури, відносної вологості та якості повітря, відносно яких може здійснюватися оцінювання поточного стану середовища. У межах даного дослідження ці нормативні вимоги виступають основою для подальшої формалізації параметрів

мікроклімату, побудови моделей оцінювання стану укриття та розроблення алгоритмів прийняття рішень щодо керування вентиляцією та обігрівом [34-41].

1.3 Огляд існуючих систем моніторингу мікроклімату

У межах розділу Сучасні системи моніторингу мікроклімату застосовуються в приміщеннях різного призначення та забезпечують контроль температури, відносної вологості, концентрації газів і загального стану повітряного середовища [42]. Для підземних споруд подвійного призначення такі системи мають особливе значення, оскільки в умовах обмеженого повітрообміну та значного скупчення людей параметри мікроклімату можуть швидко змінюватися та виходити за допустимі межі. Тому аналіз існуючих систем моніторингу є необхідним для визначення найбільш доцільного підходу до побудови кіберфізичної системи для укриттів.

Відповідно до нормативних вимог, у захисних спорудах повинні підтримуватись допустимі значення температури, вологості та якості повітря. Для забезпечення цих умов необхідно застосовувати системи, які здатні не тільки вимірювати параметри середовища, але й оперативно реагувати на їх зміну.

Існуючі системи моніторингу мікроклімату доцільно поділити на автономні, локальні та розподілені мережеві системи. Такий поділ дозволяє оцінити їх функціональні можливості, переваги, недоліки та придатність до використання в підземних спорудах подвійного призначення.

Автономні системи є найпростішим варіантом реалізації контролю параметрів середовища. Вони, як правило, являють собою окремі пристрої з одним або кількома вбудованими датчиками та модулем відображення результатів. Такі пристрої можуть контролювати температуру, вологість, а в більш складних моделях також концентрацію CO₂ або загальний індекс якості повітря без підключення до централізованих систем.

В результаті аналізу існуючих рішень у галузі моніторингу мікроклімату були виділені декілька, найбільш розповсюджених пристроїв, що є типовими та в

цілому характеризують сучасний стан галузі: PROTMECH PTH-5, Bosean T-Z01, Xiaomi MIIW, Aqara TVOC AAQS-S01 та IQAir AirVisual Pro. Вони дозволяють вимірювати температуру, відносну вологість, концентрацію летких органічних сполук (TVOC), тверді частинки (PM2.5) або окремі гази.

Почнемо з пристрою Aqara TVOC AAQS-S01 – працює через ZigBee та інтегрується в екосистему розумного дому [43]. Вимірює: VOC (леткі органічні сполуки), температуру та вологість. Недоліки: не вимірює CO₂ напряму, та більше “індикатор”, ніж повноцінна система

Пристрій вимірює температуру, вологість та рівень загальних летких органічних сполук (Total Volatile Organic Compounds, TVOC) Оснащений вбудованим екраном E-Ink. Прилад живиться від двох батарейок типу CR2450. Для роботи датчик необхідно підключити до Центру розумного будинку (Hub) Aqara з підтримкою Zigbee 3.0. Сумісний також з системами “розумний дім”: Apple Homekit, Mi Home та іншими.

Суттєвими недоліками приладу є відстеження лише одного параметру якості повітря – летких органічних сполук, відсутність сповіщення користувача про порушення нормативів температурного режиму та вологості, відсутність вбудованої пам’яті для збереження статистики.

Розглянемо також Xiaomi MIIW, пристрій оснащений рідкокристалічним дисплеєм, що відображає інформацію про температуру, вологість, час і дату [44]. Монітор якості повітря Xiaomi MIIW живиться від батареї CR2032, якої вистачає на 12 місяців. Батарейка легко змінюється. Перевагами є дешевий і простий. Недоліками пристрою є відсутність контролю якості повітря, немає автоматичного керування та обмежений функціонал.

Bosean T-Z01 – автономний промисловий газоаналізатор [45]. Зовнішній вигляд пристрою моніторингу Bosean T-Z01 наведений на рисунку 1.1.

Даний монітор вимірює: CO₂, CO, H₂S. BOSEAN T-Z01 не має можливості калібрування рівня вуглекислого газу. Отже, показники вуглекислого газу даного пристрою не є надійними. На відміну від попереднього приладу, BOSEAN T-Z01 має пам’ять для статистики, але 8 годин збереженої статистики це дуже мало.



Рисунок 1.1 – Монітор якості повітря Bosean T-Z01

Користувач не зможе порівняти дані за декілька днів між собою для кращого уявлення про стан повітря. Недоліки: дорогий та більше окремий вимірювальний прилад ніж система керування.

PROTMEX PTH-5 – автономний вимірювач температури та вологості [46]. Не має автоматичного керування чи мережевої структури. Перевагами є точність вимірювання та простий у використанні. Основним недоліком пристрою є відсутність можливості збереження статистики.

Підведемо підсумки про переваги автономних систем:

- простота використання та налаштування;
- низька вартість;
- відсутність потреби у складній інфраструктурі;
- можливість швидкого впровадження.

Проте такі системи мають суттєві недоліки:

- контроль здійснюється лише в одній точці;
- відсутній централізований збір та збереження даних;
- немає можливості комплексного аналізу параметрів;
- відсутнє автоматичне керування виконавчими пристроями;
- не враховується динаміка змін середовища.

Таким чином, автономні пристрої можуть використовуватися лише як допоміжні засоби контролю, але не забезпечують повноцінного моніторингу в укриттях.

Локальні системи будуються на основі одного контролера та набору сенсорів, які підключаються безпосередньо до нього. Вони дозволяють здійснювати збір та обробку даних у межах одного вузла. Такі системи дозволяють одночасно контролювати декілька параметрів повітряного середовища, зчитувати показники з різних датчиків, виконувати їх оброблення та відображати результати користувачу. У ряді випадків локальні системи здатні формувати попереджувальні сигнали або активувати окремі виконавчі пристрої, наприклад вентиляцію. Перевагою цього підходу є поєднання відносної простоти реалізації з достатньо широкими функціональними можливостями.

Прикладом таких систем є контролери Honeywell W7750 [47], які застосовуються для керування системами вентиляції та опалення (рис.1.2).

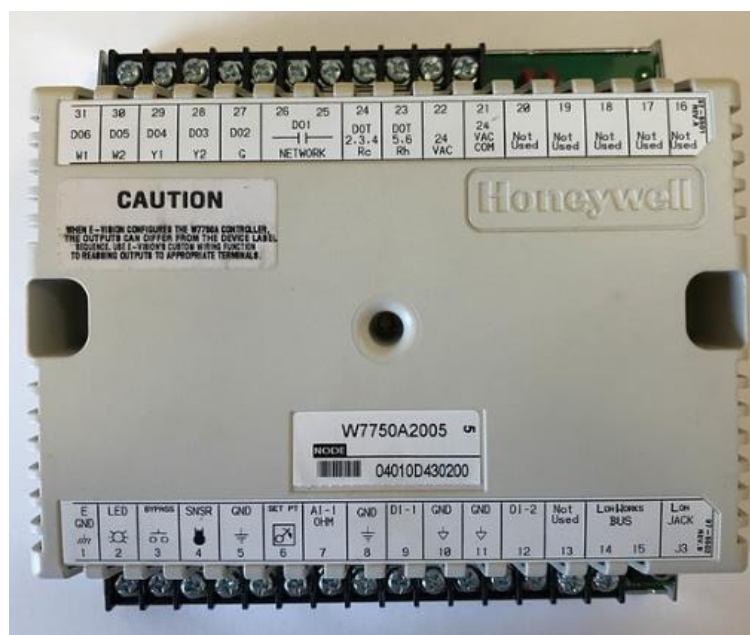


Рисунок 1.2 – Контролер Honeywell W7750

Контролер отримує дані від датчиків температури та інших параметрів і формують керуючі сигнали для обладнання. Але це частина більшої системи, а не повна система моніторингу яка забезпечують керування окремими інженерними

підсистемами.

Водночас контролери Honeywell W7750 мають низку обмежень у контексті використання в укриттях. Вони є дорогими, складними у налаштуванні та орієнтованими переважно на великі адміністративні, комерційні або промислові будівлі [47]. Крім того, такі системи зазвичай працюють за наперед заданими сценаріями керування і не завжди враховують специфіку підземних споруд подвійного призначення, де параметри мікроклімату можуть швидко змінюватися через скупчення людей, обмежений повітрообмін та локальні зони погіршення якості повітря.

Перевагами локальних систем є:

- можливість автоматичного керування інженерними системами;
- відносно проста структура;
- швидке реагування на зміну параметрів.

Недоліками локальних систем є:

- обмежене охоплення простору;
- відсутність розподіленої структури;
- використання фіксованих алгоритмів;
- відсутність адаптивного керування;
- обмежена можливість аналізу складних процесів.

Такі системи ефективні для невеликих приміщень, але недостатні для підземних укриттів з нерівномірним розподілом параметрів середовища.

Розподілені системи є найбільш складними та функціональними. Вони складаються з декількох сенсорних вузлів, які розміщуються у різних частинах приміщення та об'єднуються у єдину мережу.

До таких систем належить Siemens Desigo CC (рис.1.3).

Siemens Desigo CC забезпечує централізоване керування інженерними системами будівлі та інтегрують різні підсистеми в єдину інформаційну структуру [48].

Передача даних може здійснюватися за допомогою дротових або бездротових технологій зв'язку. Центральний сервер або мікроконтролер збирає дані, аналізує

їх і забезпечує візуалізацію параметрів у режимі реального часу.



Рисунок 1.3 – Контролер управління Siemens Desigo CC

Переваги даних систем:

- централізований контроль;
- масштабованість;
- можливість віддаленого доступу;
- інтеграція різних підсистем.

Недоліки систем:

- висока вартість;
- складність впровадження;
- потреба у кваліфікованому персоналі;
- надлишкова функціональність;
- відсутність орієнтації на укриття.

Такі системи ефективні для великих об'єктів, але не є оптимальними для підземних споруд цивільного призначення.

Окрему групу становлять системи, побудовані на основі мікроконтролерів (ESP32, Arduino) та IoT-технологій [49-50]. Вони використовують сенсори для вимірювання температури, вологості та якості повітря, після чого передають дані у

хмарне середовище.

Переваги систем побудованих на основі мікроконтролерів та IoT-технологій:

- гнучкість;
- низька вартість;
- можливість масштабування;
- простота інтеграції;
- віддалений доступ до даних.

Недоліки систем побудованих на основі мікроконтролерів та IoT-технологій:

- використання фіксованих інтервалів вимірювань;
- відсутність адаптивних алгоритмів;
- обмежене автоматичне керування;
- залежність від якості реалізації.

Результати проведеного аналізу існуючих систем моніторингу мікроклімату наведено в таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 – Порівняння існуючих систем моніторингу мікроклімату

Тип системи	Приклади	Переваги	Недоліки
Автономні	PROTMEX, Bosean, Xiaomi	Простота, низька вартість	Немає автоматизації
Локальні	Honeywell W7750	Автоматичне керування	Фіксовані алгоритми
Розподілені	Siemens, Metasys	Централізація, масштаб	Висока вартість
IoT технології	ESP32, Arduino	Гнучкість, масштабованість	Немає адаптивності
Запропонована	Кіберфізична система	Адаптивність, енергоєфективність	Потребує налаштування

Аналіз показує, що жоден тип систем не забезпечує одночасно:

- комплексного контролю;

- адаптивності;
- енергоефективності;
- автоматичного керування.

В умовах підземних укриттів особливу увагу приділяється якісному вимірюванню параметрів повітря. Це включає контроль таких основних забруднювачів повітря, як вуглекислий газ (CO_2), чадний газ (CO) та газів (метан, бутан).

Параметри якості повітря, що вимірюються:

- CO_2 (вуглекислий газ). Використовуються для оцінки рівня вентиляції в укриттях. Високий рівень CO_2 може свідчити про недостатню вентиляцію.
- CO (чадний газ). Використовуються для виявлення токсичних газів, що можуть бути результатом неповного згоряння або інших шкідливих процесів.

Такі сенсори, як MICS-5524, здатні визначати концентрацію окремих газів, що дозволяє оцінювати якість повітря в реальному часі. Їх використання дає змогу не тільки фіксувати поточний стан середовища, але й оперативно реагувати на зміни, формуючи керуючі сигнали для виконавчих пристроїв.

Оцінка якості повітря є важливим аспектом для підтримки безпеки та комфорту у підземних спорудах. У таких приміщеннях концентрація CO_2 та CO може швидко досягти критичних значень, що призведе до погіршення умов для людей. Використання даних сенсорів дозволяє оперативно виявляти такі відхилення та вживати відповідних заходів.

Для автоматичного контролю мікроклімату система моніторингу повинна не лише фіксувати значення параметрів якості повітря, а й порівнювати їх із встановленими допустимими межами. При перевищенні допустимих норм система генерує керуючі сигнали для активації вентиляції.

Після збору та обробки даних, функція оцінки стану мікроклімату бере до уваги всі контрольовані параметри, зокрема показники якості повітря. Таким чином, рівень CO_2 , CO та газів впливають на оцінку стану середовища і прийняття рішення щодо подальших дій.

Однією з тенденцій розвитку систем моніторингу є використання

кіберфізичних підходів. У таких системах фізичні сенсорні дані інтегруються з цифровими алгоритмами аналізу та прогнозування. Це дозволяє не лише фіксувати поточний стан мікроклімату, а й оцінювати ризики його погіршення в майбутньому. Застосування алгоритмів машинного навчання відкриває можливості адаптивного налаштування параметрів вентиляції залежно від реальних умов експлуатації.

IoT-системи дозволяють поєднати сенсорні вимірювання, обробку даних та передачу інформації у реальному часі з можливістю подальшого аналізу. На відміну від автономних та локальних систем, вони забезпечують гнучкість побудови, можливість масштабування та інтеграцію з віддаленими сервісами.

Разом з тим, аналіз існуючих IoT-рішень показує, що вони, як правило, реалізують лише функцію збору та передачі даних, тоді як адаптивне керування процесом вимірювань та автоматичне формування керуючих впливів реалізовані недостатньо або відсутні.

Саме це визначає напрям удосконалення існуючих підходів та обґрунтовує вибір IoT-технологій як основи для розробки запропонованої кіберфізичної системи.

Таким чином, існуючі системи моніторингу мікроклімату або мають обмежений функціонал, або характеризуються високою складністю та вартістю. Вони не забезпечують одночасно комплексного контролю параметрів середовища, адаптивного регулювання процесу вимірювань та ефективного автоматичного керування виконавчими пристроями. Це обумовлює необхідність розробки методу, який поєднує зазначені можливості та забезпечує ефективний моніторинг мікроклімату в підземних спорудах подвійного призначення.

1.4 Постановка задачі дослідження

Проведений аналіз особливостей формування мікроклімату в підземних спорудах подвійного призначення, нормативних вимог до параметрів повітряного середовища та існуючих систем моніторингу показав, що забезпечення безпечних

умов перебування людей в укриттях потребує застосування спеціалізованих технічних рішень. На відміну від звичайних наземних приміщень, підземні споруди характеризуються обмеженим природним повітрообміном, підвищеною вологістю, значною тепловою інерційністю конструкцій і суттєвим впливом антропогенного навантаження на стан внутрішнього середовища. У таких умовах навіть незначні порушення режиму вентиляції або зміна кількості людей у споруді можуть спричинити погіршення температурно-вологісного режиму та якості повітря.

Аналіз існуючих систем моніторингу мікроклімату засвідчив, що наявні рішення охоплюють широкий спектр технічних підходів – від простих автономних пристроїв до розподілених мережевих систем із віддаленим доступом до даних. Водночас для підземних споруд подвійного призначення важливими є не лише функції вимірювання окремих параметрів, а й можливість комплексного контролю стану середовища, накопичення даних, автоматизованого аналізу та формування керуючих впливів на вентиляцію й обігрів. Це зумовлює доцільність розроблення кіберфізичної системи, яка б поєднувала сенсорний рівень, обчислювальний модуль, засоби передачі даних, інтерфейс користувача та виконавчі елементи.

Отже, науково-практична задача даної роботи полягає в розробленні методу та кіберфізичної системи визначення і моніторингу мікроклімату в підземних спорудах подвійного призначення, що забезпечує безперервний контроль параметрів внутрішнього середовища, оцінювання їх поточного стану та формування керуючих впливів для підтримання допустимих умов перебування людей.

Метою роботи є підвищення ефективності контролю параметрів мікроклімату в підземних спорудах подвійного призначення шляхом розроблення методу та кіберфізичної системи моніторингу, здатної здійснювати збір, оброблення, аналіз і передавання даних про стан внутрішнього середовища, а також формувати керуючі впливи на вентиляцію та обігрів.

Для досягнення поставленої мети в роботі необхідно розв'язати такі задачі:

- провести аналіз особливостей формування мікроклімату в підземних

спорудах подвійного призначення та визначити основні фактори, що впливають на стан внутрішнього середовища;

- проаналізувати нормативні вимоги до температури, відносної вологості та показників якості повітря в укриттях;

- здійснити огляд існуючих систем моніторингу мікроклімату та визначити їх переваги, обмеження й придатність до застосування в підземних спорудах;

- розробити формалізований опис параметрів мікроклімату як об'єкта моніторингу;

- побудувати модель кіберфізичної системи визначення та моніторингу мікроклімату в укриттях;

- розробити метод збору, оброблення та оцінювання даних про параметри внутрішнього середовища;

- розробити алгоритм прийняття рішень щодо керування вентиляцією та обігрівом на основі поточного стану мікроклімату;

- реалізувати апаратно-програмну складову системи на базі мікроконтролерної платформи та сенсорних модулів;

- провести експериментальну перевірку працездатності розробленої системи та оцінити ефективність її функціонування.

У роботі передбачається, що кіберфізична система повинна забезпечувати контроль температури повітря, відносної вологості та показників якості повітряного середовища, зокрема загального рівня газового забруднення. Система має функціонувати в реальному, зберігати результати вимірювань, забезпечувати їх відображення користувачу та за потреби формувати команди на активацію виконавчих пристроїв. Такий підхід дозволяє перейти від пасивного спостереження за параметрами середовища до активного підтримання допустимого мікроклімату. Практичний результат розв'язання поставленої задачі полягає в створенні кіберфізичної системи, придатної до використання в підземних спорудах подвійного призначення для підвищення безпеки та стабільності умов перебування людей. Реалізація такої системи дає змогу своєчасно виявляти небезпечні зміни

температури, вологості та якості повітря, накопичувати історію спостережень і підвищувати обґрунтованість прийняття рішень щодо експлуатації укриття.

Таким чином, постановка задачі дослідження визначає логіку подальшої роботи, яка полягає у переході від аналізу предметної області до побудови моделей, розроблення методу, реалізації кіберфізичної системи та перевірки її ефективності в умовах, наближених до реальної експлуатації підземної споруди подвійного призначення.

1.5 Висновки

У першому розділі було проведено аналіз особливостей формування мікроклімату в підземних спорудах подвійного призначення та розглянуто основні підходи до його контролю. Встановлено, що умови внутрішнього середовища в укриттях істотно залежать від конструктивних особливостей споруди, обмеженого повітрообміну, вологості ґрунту, тепловиділення від людей та обладнання, а також від режиму роботи вентиляційних систем. Це зумовлює підвищену складність забезпечення допустимих параметрів температури, відносної вологості та якості повітря в умовах тривалого перебування людей.

У ході аналізу визначено, що основними параметрами, які найбільш повно характеризують стан мікроклімату в підземних укриттях, є температура повітря, відносна вологість та показники якості повітряного середовища (CO_2 , CO , газів метан та бутан), однак, датчик не повідомляє концентрацію якої речовини він виявив, вважаючи, що будь-яка з перерахованих речовин значно знижують якість повітря. Показано, що відхилення цих параметрів від допустимих меж можуть негативно впливати на фізичний стан, працездатність і безпеку людей, а також погіршувати санітарно-гігієнічний стан самої споруди.

Також у розділі було проаналізовано нормативні вимоги до параметрів мікроклімату в укриттях. Установлено, що нормативна база визначає допустимі межі температури, вологості та загальні вимоги до стану повітряного середовища, які мають бути враховані під час побудови системи моніторингу. Це дозволяє

використовувати нормативні значення як основу для формування порогових критеріїв оцінювання стану мікроклімату та прийняття подальших рішень щодо керування вентиляцією й обігрівом.

Крім того, було розглянуто існуючі системи моніторингу мікроклімату. Визначено, що сучасні технічні рішення охоплюють автономні, локальні та розподілені мережеві системи, які відрізняються рівнем складності, функціональними можливостями та ступенем автоматизації. Установлено, що для підземних споруд подвійного призначення найбільш доцільним є використання комплексного автоматизованого підходу, який забезпечує не лише вимірювання окремих параметрів, а й накопичення даних, їх аналіз, відображення результатів і формування керуючих впливів.

На основі проведеного аналізу сформульовано задачу дослідження, яка полягає в розробленні методу та кіберфізичної системи визначення і моніторингу мікроклімату в підземних спорудах подвійного призначення. Така система повинна забезпечувати безперервний контроль параметрів внутрішнього середовища, оцінювання їх стану та підтримання допустимих умов перебування людей шляхом керування вентиляцією та обігрівом.

Отже, результати першого розділу підтверджують актуальність розроблення спеціалізованої кіберфізичної системи моніторингу мікроклімату для укриттів та створюють необхідне теоретичне підґрунтя для подальшого моделювання системи, розроблення методу її функціонування та практичної реалізації.

2 МОДЕЛЮВАННЯ КІБЕРФІЗИЧНОЇ СИСТЕМИ ВИЗНАЧЕННЯ ТА МОНІТОРИНГУ МІКРОКЛІМАТУ В УКРИТТЯ

2.1 Формалізований опис параметрів мікроклімату як об'єкта моніторингу

Для побудови кіберфізичної системи визначення та моніторингу мікроклімату в підземних спорудах подвійного призначення необхідно формалізувати основні параметри внутрішнього середовища, які підлягають контролю. Формалізація дозволяє подати мікроклімат не лише описово, а й у вигляді сукупності змінних, значення яких можуть вимірюватися, аналізуватися та використовуватися для прийняття подальших рішень.

Стан мікроклімату в укритті доцільно описувати трьома основними параметрами: температурою повітря, відносною вологістю та показником якості повітря [53, 11]. Тоді стан мікроклімату можна подати у вигляді:

$$M = \{T, H, A\}, \quad (2.1)$$

де T – температура повітря;

H – відносна вологість повітря;

A – показник якості повітря.

Таке подання є зручним, оскільки дозволяє розглядати мікроклімат як сукупність основних величин, які характеризують стан внутрішнього середовища в укритті. У реальних умовах значення цих параметрів змінюються під впливом зовнішніх і внутрішніх факторів, зокрема кількості людей, стану вентиляції, роботи обладнання та особливостей самої споруди.

Температура повітря є одним із головних параметрів, що впливають на комфорт і безпечність перебування людей. У підземних спорудах вона може змінюватися внаслідок тепловиділення від людей, роботи освітлення, електронного обладнання та недостатньої вентиляції. Відносна вологість повітря також є важливим параметром, оскільки її підвищення може призводити до утворення конденсату, розвитку грибка та погіршення санітарного стану приміщення [1].

Показник якості повітря відображає загальний стан газового середовища та може використовуватися як індикатор погіршення повітрообміну або накопичення небажаних домішок.

Для кожного з контрольованих параметрів задаються допустимі межі.

Допустимі межі для температури:

$$T_{min} \leq T \leq T_{max}. \quad (2.2)$$

Допустимі межі для вологості:

$$H_{min} \leq H \leq H_{max}. \quad (2.3)$$

Допустимі межі для якості повітря:

$$A_{min} \leq A \leq A_{max}. \quad (2.4)$$

Якщо значення параметра перебуває в межах допустимого діапазону, такий стан вважається нормальним. Якщо ж значення виходить за встановлені межі, це означає відхилення від допустимого стану мікроклімату.

Для спрощеного оцінювання відхилення параметрів доцільно використовувати різницю між фактичним значенням та допустимою межею. Для температури відхилення можна визначати так:

$$\Delta T = T - T_{доп}, \quad (2.5)$$

де $T_{доп}$ – допустиме значення температури.

Аналогічно для вологості:

$$\Delta H = H - H_{доп}. \quad (2.6)$$

Для якості повітря відхилення визначається:

$$\Delta A = A - A_{\text{доп}}. \quad (2.7)$$

Таке подання є простим і зручним для практичного застосування. Якщо значення відхилення близьке до нуля, параметр перебуває в допустимих межах або поблизу них. Якщо відхилення є додатним і достатньо великим, це свідчить про перевищення норми. Якщо значення є від'ємним, це може вказувати на занижений рівень параметра відносно допустимого.

Для загальної оцінки стану мікроклімату доцільно використовувати інтегральний показник, який враховує всі три параметри:

$$K = k_1 \Delta T + k_2 \Delta H + k_3 \Delta A, \quad (2.8)$$

де k_1, k_2, k_3 – вагові коефіцієнти, які показують важливість відповідних параметрів.

Використання інтегрального показника дозволяє перейти від аналізу окремих величин до загальної оцінки стану мікроклімату. Якщо значення K не перевищує встановленого порогу, стан середовища можна вважати допустимим. Якщо ж значення інтегрального показника перевищує порогове, це свідчить про необхідність втручання в роботу системи, зокрема вмикання вентиляції або обігріву.

Оскільки система моніторингу працює циклічно, параметри мікроклімату доцільно розглядати як послідовність вимірних значень:

$$M_i = \{T_i, H_i, A_i\}, \quad (2.9)$$

де i – номер циклу вимірювання.

Це дозволяє накопичувати дані в часі, зберігати історію вимірювань та аналізувати зміну стану середовища. Такий підхід є достатнім для реалізації

системи моніторингу на базі мікроконтролера та подальшого побудови алгоритмів оцінювання й керування.

Таким чином, формалізований опис параметрів мікроклімату як об'єкта моніторингу дозволяє подати стан внутрішнього середовища укриття у вигляді сукупності основних змінних, для яких задаються допустимі межі та визначаються відхилення від нормативного стану. Це створює основу для побудови моделі кіберфізичної системи, розроблення методів оцінювання стану мікроклімату та формування керуючих впливів на вентиляцію й обігрів.

2.2 Модель кіберфізичної системи визначення та моніторингу мікроклімату

Для забезпечення ефективного контролю параметрів мікроклімату в підземних спорудах подвійного призначення доцільно використовувати кіберфізичну систему, яка поєднує засоби вимірювання, оброблення, передавання даних та керування виконавчими пристроями.

Кіберфізична система розглядається як сукупність взаємопов'язаних функціональних підсистем, які забезпечують повний цикл обробки інформації – від отримання даних до формування керуючих впливів. Узагальнену структуру системи можна подати у вигляді п'яти основних підсистем:

- підсистема збору даних;
- підсистема оброблення та аналізу даних;
- підсистема передавання та збереження інформації;
- підсистема відображення інформації;
- підсистема виконавчих елементів.

Загальна структурна модель кіберфізичної системи моніторингу мікроклімату наведена на рисунку 2.1.

Підсистема збору даних призначена для вимірювання основних параметрів мікроклімату, що характеризують стан повітряного середовища в укритті. До таких параметрів належать температура повітря, відносна вологість, концентрація вуглекислого газу, чадного газу, та газів. Саме ці параметри найбільш повно

характеризують якість повітря у замкненому просторі укриття та безпосередньо впливають на безпеку перебування людей. На цьому рівні система безпосередньо взаємодіє з фізичним середовищем, тому ця підсистема є фізичним рівнем кіберфізичної системи.

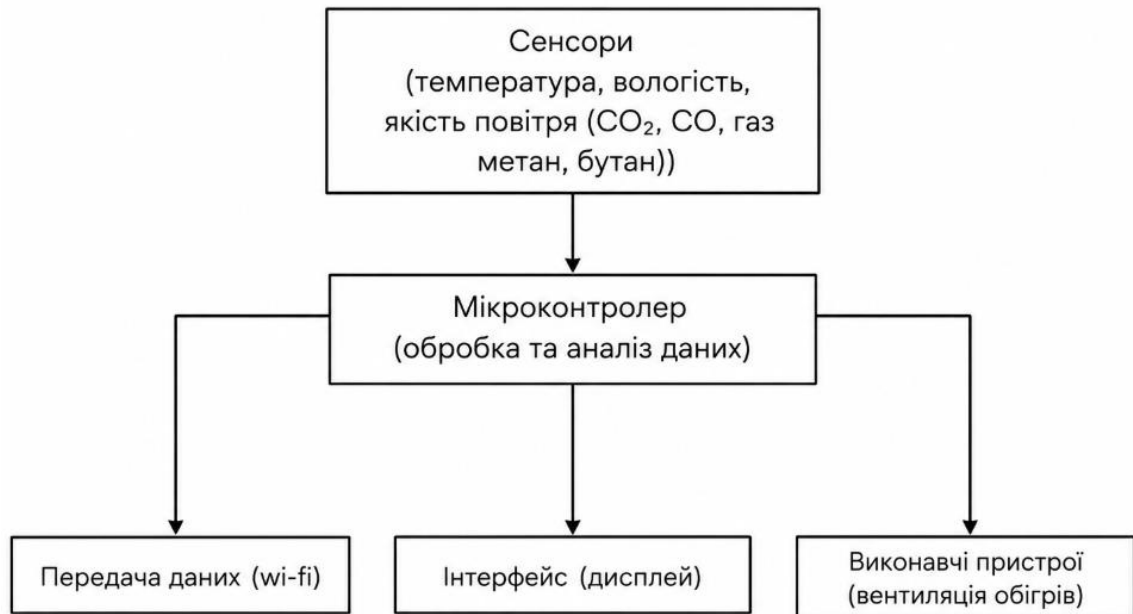


Рисунок 2.1 – Модель кіберфізичної системи моніторингу мікроклімату

Сенсори можуть бути розміщені в різних точках укриття для отримання просторово розподілених даних. Це дозволяє враховувати неоднорідність мікроклімату.

Отримані дані надходять до підсистеми оброблення та аналізу, де здійснюється їх перевірка, порівняння з допустимими значеннями та визначення поточного стану мікроклімату. На цьому етапі формується оцінка стану середовища, яка може бути використана для подальшого прийняття рішень.

Цей рівень реалізується на базі мікроконтролера (ESP32), який виконує наступні задачі:

- зчитування даних із сенсорів через інтерфейси I2C, UART, SPI;
- первинна обробку (фільтрацію шумів, усереднення, перевірку на аномалії);
- порівняння з допустимими пороговими значеннями;

- формування пакетів даних для передачі.

Центральний контролер також відповідає за синхронізацію роботи всіх компонентів системи та реалізацію алгоритму функціонування системи моніторингу. Тобто мікроконтролер виступає центральним вузлом системи, який координує роботу всіх підключених модулів [54-55].

Підсистема передавання та збереження даних забезпечує обмін інформацією між компонентами системи та її інтеграцію з зовнішнім середовищем. Дані можуть передаватися у хмарне середовище або зберігатися для подальшого аналізу, що дозволяє відстежувати динаміку змін параметрів мікроклімату.

Підсистема відображення інформації призначена для візуалізації параметрів середовища та результатів їх аналізу. Інформація може відображатися у вигляді показників на дисплеї, у мобільному застосунку або веб-інтерфейсі. Це забезпечує взаємодію користувача із системою та можливість оперативного контролю стану мікроклімату.

Підсистема виконавчих елементів реалізує активний вплив на параметри середовища. У разі виявлення відхилень від допустимих значень система формує керуючі сигнали для ввімкнення або вимкнення вентиляції чи обігріву. Це дозволяє автоматично підтримувати параметри мікроклімату в заданих межах.

Відповідно, модель системи передбачає, що результат аналізу стану мікроклімату може використовуватися для формування команд на ввімкнення або вимкнення відповідних пристроїв.

Таким чином, якщо параметри середовища перебувають у межах допустимих значень, виконавчі елементи залишаються неактивними або працюють у штатному режимі. Якщо ж у системі фіксується відхилення, формується команда на активацію вентиляції або обігріву.

Це означає, що після збору даних і їх оброблення результати одночасно можуть:

- передаватися або зберігатися;
- відображатися користувачу;
- використовуватися для формування керуючих впливів.

Особливістю кіберфізичної системи є поєднання інформаційного та фізичного рівнів. Інформаційний рівень включає збір, оброблення, передавання та відображення даних. Фізичний рівень включає реальне середовище укриття, сенсори та виконавчі пристрої, які взаємодіють із параметрами цього середовища. Саме зв'язок між цими двома рівнями забезпечує можливість не лише спостерігати за станом мікроклімату, а й впливати на нього.

Кіберфізична система також має циклічний характер роботи. Після кожного вимірювання та аналізу даних виконується новий цикл спостереження. Це дозволяє забезпечити безперервний моніторинг параметрів мікроклімату в реальному часі.

Таке подання відображає, що в кожен момент спостереження система має певний набір вимірних даних, результатів оброблення, збережених або переданих значень, відображеної інформації та станів виконавчих елементів.

Отже, модель кіберфізичної системи визначення та моніторингу мікроклімату в підземних спорудах подвійного призначення описує її як сукупність взаємопов'язаних функціональних підсистем, що забезпечують збір, аналіз, передавання, відображення та використання даних для керування параметрами внутрішнього середовища. Така модель є основою для подальшого розроблення структурної схеми системи, моделі руху даних та алгоритмів прийняття рішень щодо керування вентиляцією та обігрівом.

2.3 Структурна модель взаємодії сенсорних, обчислювальних і виконавчих компонентів системи

Структурна модель кіберфізичної системи моніторингу мікроклімату відображає склад основних компонентів системи та характер їх взаємодії між собою. На відміну від загальної моделі, структурна модель деталізує, які саме функціональні блоки входять до системи, як між ними передаються дані та яким чином формується керуючий вплив на виконавчі пристрої.

Система складається з таких основних компонентів:

- сенсорного блоку;

- мікроконтролерного обчислювального модуля;
- інтерфейсу відображення інформації;
- підсистеми передавання та збереження даних;
- виконавчих елементів.

Сенсорний блок призначений для зчитування параметрів мікроклімату, зокрема температури повітря, відносної вологості та показників якості повітря. Він є вхідною частиною системи та забезпечує формування первинних даних про стан внутрішнього середовища укриття.

Сенсорний блок призначений для первинного зчитування параметрів мікроклімату. До його складу входять датчики температури, відносної вологості та якості повітря (CO₂, CO) та газів метан/бутан. У розроблюваній системі для контролю температури й вологості може використовуватися цифровий датчик температури та вологості DHT22, для оцінки вуглекислого газу датчик MH-Z14B, а для оцінювання якості повітря і газів – сенсор якості повітря MICS-5524 [56-58]. Сенсорний блок є вхідною частиною системи, оскільки саме він формує первинні дані про стан внутрішнього середовища укриття.

Мікроконтролерний модуль є центральним елементом системи. Після зчитування даних мікроконтролер виконує їх аналіз. Якщо параметри перебувають у межах допустимих значень, система продовжує штатний режим моніторингу. Якщо ж виявлено відхилення, мікроконтролер формує відповідні керуючі сигнали.

У ролі такого модуля використовується мікроконтролер ESP32, який забезпечує достатню обчислювальну потужність та підтримує бездротову передачу даних.

Інтерфейс відображення інформації призначений для візуалізації параметрів мікроклімату та стану системи. Він може реалізовуватися у вигляді дисплея, світлової індикації або веб-інтерфейсу, що забезпечує взаємодію користувача із системою.

Підсистема передавання та збереження даних забезпечує передачу інформації до зовнішнього середовища або її локальне накопичення. Дані можуть передаватися на віддалений сервер або у хмарне середовище, що дозволяє

здійснювати дистанційний моніторинг та аналіз змін параметрів мікроклімату в динаміці.

Виконавчі елементи призначені для активного впливу на стан мікроклімату. У кіберфізичній системі такими елементами є система вентиляції та обігріву.

Якщо температура знижується нижче допустимого рівня, мікроконтролер може сформувати команду на ввімкнення обігріву. Якщо температура перевищує допустиму межу або погіршується якість повітря, система може активувати вентиляцію.

Загальну взаємодію компонентів системи можна подати у вигляді:

$$S = \{S_b, M_c, I, P, E\}, \quad (2.10)$$

де S_b – сенсорний блок;

M_c – мікроконтролерний модуль;

I – інтерфейс відображення інформації;

P – підсистема передавання та збереження даних;

E – виконавчі елементи.

Цей вираз відображає послідовність функціонування системи: дані від сенсорів надходять до мікроконтролера, після оброблення передаються до інтерфейсу користувача та підсистеми збереження, а також використовуються для формування керуючих впливів.

Важливою особливістю структурної моделі є її модульність. Кожен компонент системи виконує окрему функцію, але всі блоки об'єднані в єдину систему через мікроконтролерний модуль [59]. Такий підхід забезпечує можливість подальшого розширення системи шляхом додавання нових сенсорів, виконавчих пристроїв або зміни способу передавання даних.

Крім того, система працює в циклічному режимі: після завершення одного циклу вимірювання, оброблення та керування вона переходить до наступного. Це забезпечує безперервний моніторинг параметрів мікроклімату в реальному або близькому до реального часу.

Таким чином, кіберфізична система моніторингу мікроклімату реалізує повний цикл функціонування: збір даних, їх оброблення, передавання, відображення та формування керуючих впливів, що дозволяє забезпечити підтримання допустимих умов у підземних спорудах подвійного призначення.

2.4 Модель збору, обробки та оцінювання даних

Модель збору, обробки та оцінювання даних є основою для функціонування кіберфізичної системи моніторингу мікроклімату (рис.2.2). Вона визначає, як саме будуть збиратися, оброблятися та аналізуватися дані з сенсорних модулів, а також як буде здійснюватися оцінка стану мікроклімату для подальшого прийняття рішень. Оскільки мікроклімат змінюється під впливом різноманітних факторів, важливо, щоб система могла здійснювати моніторинг у реальному часі та своєчасно реагувати на відхилення від допустимих значень.

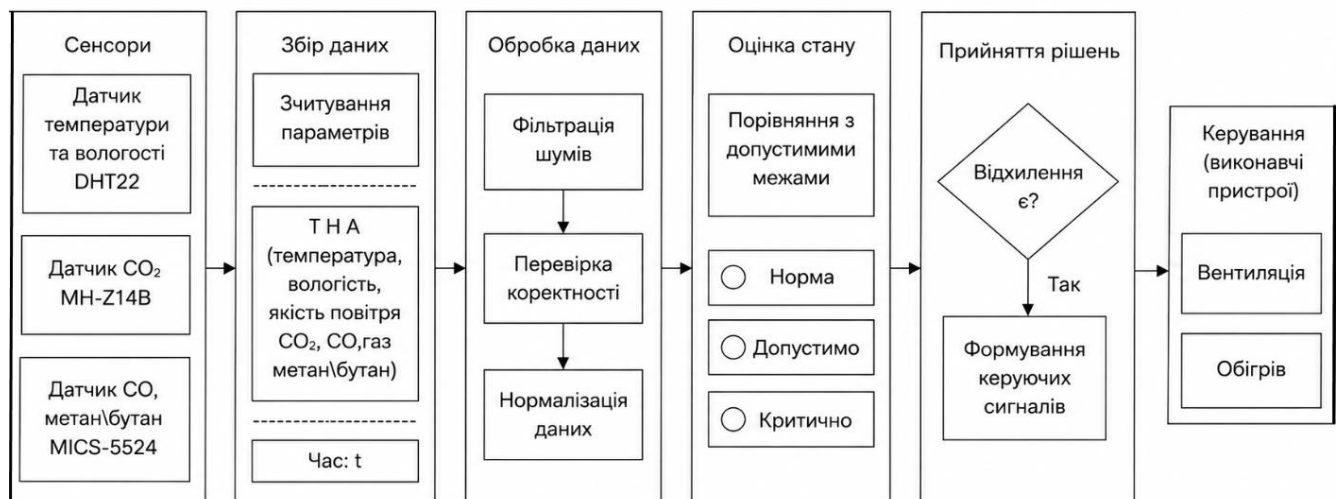


Рисунок 2.2 – Модель збору, обробки та оцінювання даних

Структура системи збору, обробки та оцінювання даних:

1. Збір даних. На цьому етапі сенсори вимірюють основні параметри мікроклімату: температуру, вологість, якість повітря CO₂, CO, газ метан/бутан. Датчики працюють за принципом перетворення фізичних величин у електричний сигнал, який передається через аналоговий або цифровий інтерфейс.

2. Обробка даних. Даний етап включає перевірку коректності вимірювань, чи знаходяться значення параметрів у допустимих межах та фільтрацію шумів, що полягає у видаленні помилкових або непередбачуваних вимірювань, що можуть бути результатом перешкод або неточностей датчиків. Також на даний етап включає перетворення даних у відповідний формат для подальшого аналізу.

3. Оцінка стану мікроклімату. Оцінка здійснюється на основі оброблених даних. Дані порівняння з допустимими межами та визначається рівень відхилення від норм. Стан мікроклімату може бути оцінений як:

- нормальний, коли всі параметри перебувають у межах допустимих значень;
- допустимий, коли параметри в межах допустимих значень, але наближаються до межі;
- критичний, коли параметри вийшли за межі встановлених норм.

4. Прийняття рішень. Оцінка стану мікроклімату дає змогу:

- продовжити моніторинг без змін, якщо параметри в межах допустимих значень;
- активувати виконавчі механізми (вентиляція, обігрів), якщо відхилення критичне.

5. Керування виконавчими механізмами. На даному етапі у разі критичного відхилення показників мікроклімату активуються вентилятори або обігрівачі для стабілізації параметрів мікроклімату. Модель забезпечує стабільність внутрішнього середовища укриттів, підвищуючи безпеку та комфорт для людей.

6. Адаптивні алгоритми. Алгоритми налаштовують частоту вимірювань і керують виконавчими пристроями для забезпечення енергоефективності. Збір даних циклічний з адаптивною зміною частоти вимірювань.

Модель збору, обробки та оцінювання даних є основою для функціонування автоматизованої системи моніторингу мікроклімату. Вона дозволяє не лише здійснювати постійний контроль температури, вологості та якості повітря, а й

своєчасно реагувати на зміни середовища. Використання такої моделі забезпечує стабільність внутрішнього середовища укриттів, підвищуючи безпеку і комфорт для людей, що перебувають в них.

Завдяки використанню адаптивних алгоритмів та циклічного збору даних, система може автоматично налаштовувати частоту вимірювань і керувати виконавчими пристроями, забезпечуючи енергоефективність та зручність використання.

2.5 Модель оцінки і коригування параметрів мікроклімату з адаптивним алгоритмом вимірювань

Для забезпечення ефективного моніторингу мікроклімату та своєчасного реагування на зміни стану середовища в підземних спорудах подвійного призначення необхідно розробити алгоритми, які будуть здійснювати оцінку поточного стану параметрів мікроклімату і коригувати їх в залежності від отриманих даних. Алгоритми мають забезпечувати не лише перевірку параметрів, а й автоматичне керування виконавчими пристроями, такими як вентиляція та обігрів, для підтримання стабільних умов у укриттях.

Блок-схема оцінки та коригування параметрів мікроклімату наведена на рисунку 2.3.

Опис роботи алгоритму:

- збір даних;
- порівняння з допустимими межами;
- коригування параметрів;
- адаптивне коригування частоти вимірювань;
- інтерфейс з користувачем.

На етапі збору даних сенсори вимірюють температуру (T), вологість (H) та якість повітря (A). Дані з сенсорів передаються до центрального мікроконтролера для обробки.

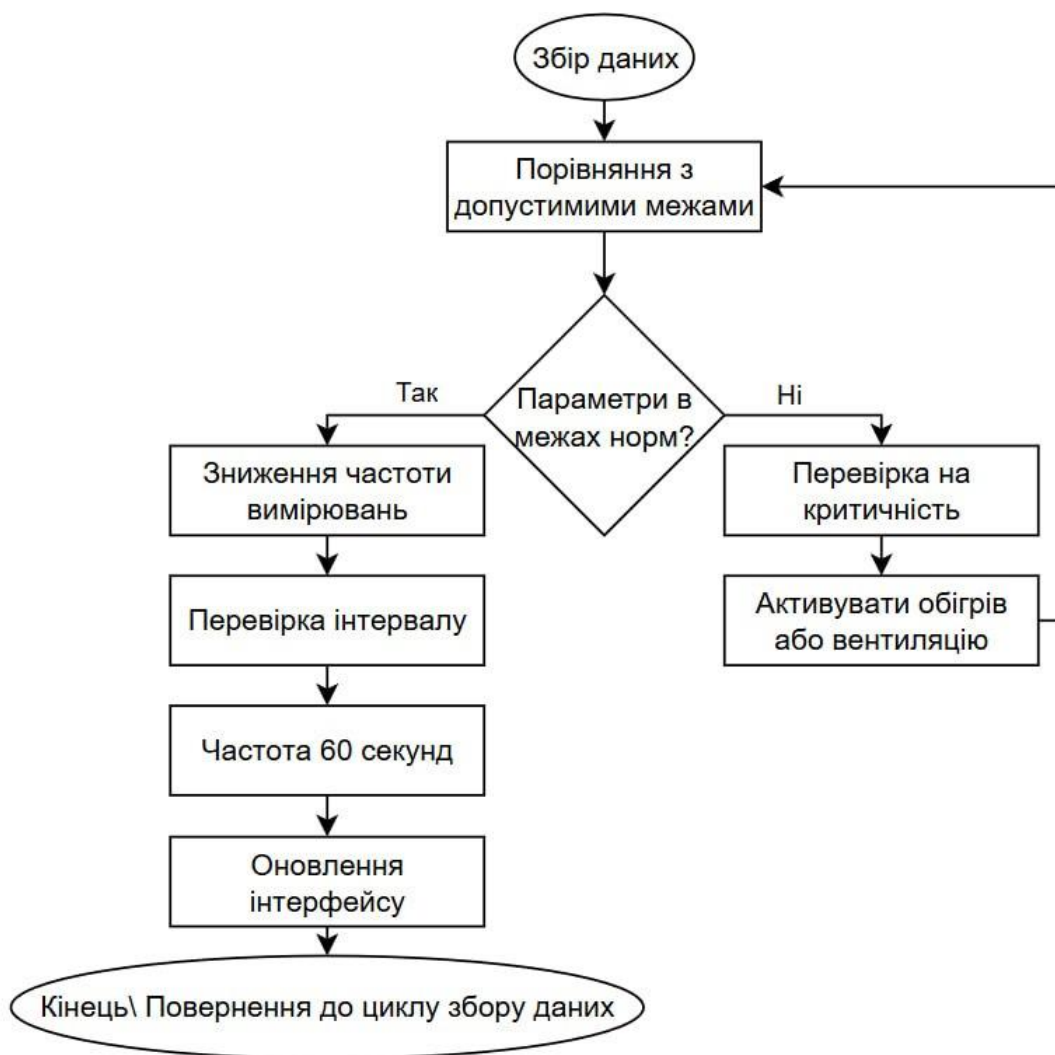


Рисунок 2.3 – Блок-схема оцінки та коригування параметрів мікроклімату

На етапі порівняння з допустимими межами відбувається порівняння отриманих значень з максимальними та мінімальними допустимими значеннями:

- $T_{max}, H_{max}, A_{max}$;
- $T_{min}, H_{min}, A_{min}$.

Далі визначається стан середовища:

- нормальний, коли всі параметри в межах допустимих значень;
- допустимий, коли хоча б один параметр наближається до межі;
- критичний, коли хоча б один параметр перевищує або нижче встановленої межі.

Наступним етапом є коригування параметрів, якщо параметри знаходяться в межах нормальних значень, проводиться перевірка параметрів через стандартний

інтервал часу (наприклад, кожні 30 секунд). Якщо значення виходять за межі, то програма визначає стан середовища, як критичний стан. І відбувається активація вентиляції або обігріву в залежності від конкретного параметра. При допустимому стану, надається попередження користувачу, щоб той звернув увагу на можливі зміни.

Етап адаптивного коригування частоти вимірювань передбачає два стани програми. При першому застосовується зменшення частоти вимірювань до 60 секунд для економії енергії, якщо всі параметри стабільні. При другому стані частота вимірювань повертається до 30 секунд, коли хоча б один параметр виходить за межі норми.

Після кожного коригування система повідомляє користувача через інтерфейс чи мобільний додаток про стан мікроклімату та виконані зміни. У разі критичних відхилень система надсилає попередження.

Алгоритми оцінки та коригування параметрів мікроклімату є важливою складовою кіберфізичної системи моніторингу, оскільки вони забезпечують оперативну реакцію на зміни середовища. Використання адаптивних алгоритмів дозволяє оптимізувати енергоспоживання, а система автоматичного коригування температури, вологості та якості повітря підтримує стабільні умови в укриттях. Це сприяє покращенню безпеки, комфорту та ефективності використання підземних споруд подвійного призначення [60-63].

2.6 Модель управління вентиляцією та обігрівом

Управління вентиляцією та обігрівом є важливими елементами підтримки належного мікроклімату в підземних спорудах подвійного призначення. Виконання коригувальних дій, таких як активація вентиляції або обігріву, залежить від оцінки поточного стану параметрів мікроклімату та визначених порогових значень. Алгоритм управління (прийняття рішень) має забезпечувати оптимальну реакцію на зміни стану середовища та мінімізувати енергоспоживання, зберігаючи комфортні та безпечні умови для перебування людей.

Для кожного параметра мікроклімату визначаються допустимі межі, відповідно до яких здійснюється оцінювання стану середовища. У разі перевищення або зниження параметрів відносно заданих значень система ініціює відповідні керуючі дії.

На основі аналізу отриманих даних система формує керуючі впливи на виконавчі пристрої. Зокрема, при зниженні температури нижче допустимого рівня активується система обігріву, а у разі перевищення температури або погіршення якості повітря – система вентиляції. Таким чином забезпечується підтримання параметрів мікроклімату в межах допустимих значень.

Обігрів у підземних спорудах подвійного призначення активується, коли температура повітря або вологість опускається нижче допустимих меж, встановлених для комфортних умов перебування людей. Оскільки низька температура або висока вологість можуть призводити до переохолодження людей та зниження їх працездатності, система повинна автоматично включати обігрів, коли це необхідно.

Алгоритм управління обігрівом має наступний вигляд:

- 1) збір даних показників температури та вологості від відповідних сенсорів;
- 2) порівняння з мінімальними значеннями та перевірка чи значення перевищують мінімально допустимі значення;
- 3) активування обігріву у разі виявлення відхилень;
- 4) відстеження зміни параметрів показників після активації обігріву до досягнення допустимих значень;
- 5) вимкнення обігріву, коли параметри стабілізуються в межах норм.

Вентиляція активується для відведення надмірного тепла, вологи та газів, зокрема CO₂, які накопичуються в замкнених приміщеннях. Коли концентрація CO₂ або температура досягає високих значень, система повинна ініціювати вентиляцію для забезпечення свіжого повітря та нормалізації умов середовища.

Алгоритм управління вентиляцією включає такі етапи:

- 1) збір даних показників температури, вологості та концентрації газів від

відповідних сенсорів;

- 2) порівняння з допустимими межами;
- 3) активування вентиляції у разі перевищення допустимих значень;
- 4) відстеження зміни параметрів показників після активації вентиляції до досягнення допустимих значень температури, вологості і концентрації газів;
- 5) вимкнення вентиляції, коли параметри нормалізуються.

Якщо виявлено відхилення параметрів від норми, система активує відповідні керуючі алгоритми. Прийняття рішення при зміні температури (рис. 2.3).



Рисунок 2.3 – Блок-схема прийняття рішень при зміні температури

Логіка керування визначається характером відхилення параметрів. Зокрема, при зниженні температури нижче допустимого рівня формується команда на ввімкнення системи обігріву. У разі перевищення температури або погіршення

якості повітря активується система вентиляції. Аналогічно, при підвищенні рівня вологості чи показників якості повітря, може бути задіяна вентиляція для нормалізації стану повітряного середовища (рис. 2.4).

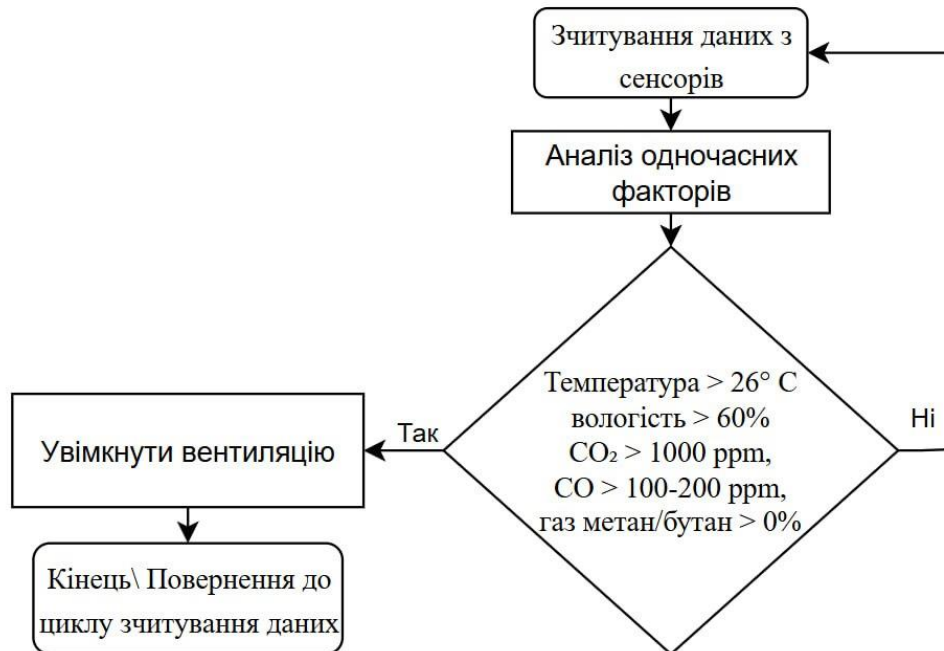


Рисунок 2.4 – Блок-схема логіка сценаріїв

Важливою особливістю моделі є її простота та ефективність реалізації на мікроконтролерній платформі.

Таким чином, модель прийняття рішень забезпечує перехід від оцінки стану мікроклімату до формування конкретних керуючих впливів на вентиляцію та обігрів. Це дозволяє автоматизувати процес підтримання допустимих умов у підземних спорудах.

2.7 Висновки

У другому розділі було сформовано модель кіберфізичної системи визначення та моніторингу мікроклімату в підземних спорудах подвійного призначення. Проведена формалізація параметрів внутрішнього середовища дозволила представити мікроклімат як сукупність основних змінних, зокрема

температури, відносної вологості та показника якості повітря, що забезпечує можливість їх кількісного аналізу.

Розроблена модель системи описує взаємодію сенсорних, обчислювальних та виконавчих компонентів і відображає повний цикл функціонування, який включає збір даних, їх оброблення, оцінювання стану середовища та формування керуючих впливів. Такий підхід дозволяє інтегрувати фізичні процеси та інформаційні технології в єдину систему моніторингу.

У процесі дослідження було визначено, що ефективність функціонування системи значною мірою залежить від якості оброблення сенсорних даних, їх узгодженості та своєчасності аналізу. Використання формалізованих моделей дозволяє забезпечити перехід від первинних вимірювань до узагальненої оцінки стану мікроклімату та подальшого прийняття рішень.

Запропонований підхід до оцінювання стану середовища дає можливість визначати рівень відхилення параметрів від допустимих значень і класифікувати стан мікроклімату відповідно до встановлених критеріїв. Це створює основу для автоматизованого реагування системи на зміну умов у підземних спорудах.

Сформована модель прийняття рішень забезпечує можливість автоматичного керування вентиляцією та обігрівом залежно від поточного стану параметрів середовища. Це дозволяє підтримувати допустимі умови перебування людей без необхідності постійного втручання користувача.

Таким чином, у другому розділі закладено теоретичну основу для побудови кіберфізичної системи моніторингу мікроклімату, яка охоплює процеси збору, оброблення та аналізу даних, а також формування керуючих впливів. Отримані результати є базою для подальшого розроблення методів і алгоритмів функціонування системи, що розглядаються у наступному розділі.

3 РОЗРОБЛЕННЯ МЕТОДУ ВИЗНАЧЕННЯ ТА МОНІТОРИНГУ МІКРОКЛІМАТУ В ПІДЗЕМНИХ СПОРУДАХ

3.1 Метод збору та попередньої обробки даних зі сенсорів

Для ефективного функціонування кіберфізичної системи моніторингу мікроклімату в підземних спорудах подвійного призначення необхідно забезпечити безперервний збір та попередню обробку даних із сенсорних модулів. Саме від якості первинних вимірювань залежить точність подальшого оцінювання стану середовища, а також правильність формування керуючих впливів на вентиляцію та обігрів. З урахуванням специфіки підземних споруд, де умови експлуатації є нестабільними, а вплив зовнішніх факторів може змінювати параметри мікроклімату, метод збору даних повинен забезпечувати достатню достовірність і регулярність вимірювань.

У межах розроблюваної системи моніторингу контролюються наступні основні параметри: температура повітря, відносна вологість, показники якості повітря (CO_2 , CO та газів метан та бутан) однак, датчик не повідомляє концентрацію якої речовини він виявив, вважаючи, що будь-яка з перерахованих речовин значно знижують якість повітря.

Важливість контролю якості повітря у підземних спорудах подвійного призначення є надзвичайно високою, оскільки умови в таких приміщеннях можуть змінюватися через скупчення людей, обмежений повітрообмін та тривале перебування без вентиляції. Контроль параметрів, таких як CO_2 , CO , а також метан та бутан, дозволяє забезпечити комфортне та безпечне середовище для перебування людей.

CO_2 є основним показником ефективності вентиляційної системи в підземних спорудах. Високий рівень CO_2 може свідчити про недостатню вентиляцію і накопичення вуглекислого газу через дихання людей. В умовах укриття, де кількість людей може бути значною, концентрація CO_2 може швидко підвищуватися, що призводить до зниження кисневого рівня в повітрі і погіршення самопочуття (головний біль, сонливість, нудота) [64-65].

СО є токсичним газом, що утворюється при неповному згорянні органічних матеріалів, таких як палива або деревина. Високі концентрації СО можуть бути смертельними, тому його контроль в укриттях є критично важливим.

Метан та бутан є горючими газами, які можуть бути небезпечними в підземних спорудах через їх здатність утворювати вибухонебезпечні суміші з повітрям. Це особливо важливо для підземних укриттів, де газ може накопичуватись в замкненому просторі. Підвищена концентрація цих газів може призвести до вибуху або пожежі.

Для вимірювання температури і вологості використовується датчик DHT22, який має достатню точність, стабільність роботи та зручний цифровий інтерфейс підключення (рис.3.1).



Рисунок 3.1 – Цифровий датчик температури та вологості DHT22

Даний сенсор дозволяє вимірювати температуру в діапазоні від -40°C до $+80^{\circ}\text{C}$ та відносну вологість у межах від 0 до 100 %, що є достатнім для задач моніторингу мікроклімату в укриттях [56].

Для вимірювання вуглекислого газу використовується датчик MH-Z19В це поширений інфрачервоний датчик, який використовує технологію недисперсійного інфрачервоного випромінювання задля виявлення вуглекислого газу з високою селективністю (рис.3.2). Показники датчика не залежать від концентрації інших забруднювачів у повітрі. MH-Z19В вимірює вуглекислий газ напряму, що є суттєвою перевагою датчика. Цей датчик має прийнятний баланс між енерговитратами та вимогами до напруги живлення. Що стосується швидкості відгуку, MH-Z19В має достатній час відгуку, оскільки швидкість зміни рівня CO_2 у

приміщенні не вимагає миттєвих вимірювань [58].



Рисунок 3.2 – Сенсор MH-Z14B

Для оцінювання якості повітря використовується сенсор MICS-5524, який реагує на зміну концентрації окремих газових домішок і може бути використаний як індикатор загального погіршення газового середовища. Датчик MICS5524 розроблений для виявлення вмісту ряду речовин; етанол (від 10 до 500 ppm), CO (від 1 до 1000 ppm), водень (від 1 до 1000 ppm), аміак (від 1 до 500 ppm) та газів метан та бутан (>1000 ppm) (рис.3.3) [57].



Рисунок 3.3 – Датчик якості повітря MICS-5524

Збір даних реалізується у циклічному режимі, що передбачає періодичне зчитування значень із сенсорів через заданий інтервал часу. Такий підхід дозволяє здійснювати постійний контроль стану внутрішнього середовища та фіксувати його зміну в динаміці. Для кожного циклу вимірювання формується окремий набір

значень:

$$D = \{T_i, H_i, A_i\}, \quad (3.1)$$

де i – номер циклу вимірювання.

Отримані сенсорні дані передаються до мікроконтролерного модуля ESP32, який забезпечує їх подальше оброблення. На цьому етапі важливим є не лише зчитування значень, а й перевірка їхньої коректності. У процесі функціонування системи можливі короткочасні збої сенсорів, випадкові шумові коливання, а також поява значень, що не відповідають фізично можливим межах. Саме тому метод збору даних передбачає попередню перевірку результатів вимірювання перед їх використанням у подальших розрахунках.

Попередня обробка даних виконується з метою підвищення їхньої достовірності та підготовки до наступного етапу аналізу. Узагальнено цей процес можна подати у вигляді:

$$O = f(D), \quad (3.2)$$

де O – оброблені дані;

$f(D)$, – функція попередньої обробки.

У дискретному вигляді для кожного циклу:

$$O_i = f(D_i). \quad (3.3)$$

Функція попередньої обробки включає кілька послідовних операцій. Насамперед здійснюється перевірка значень на відповідність допустимим фізичним межах. Наприклад, температура не повинна виходити за межі робочого діапазону застосованого сенсора, а значення відносної вологості не може бути меншим за 0 % або більшим за 100 %. Якщо отримане значення не відповідає цим умовам, воно розглядається як некоректне і не використовується для подальшого

аналізу.

Другим етапом є згладжування випадкових коливань, які можуть виникати внаслідок електромагнітних завад, короткочасної нестабільності сенсора або зовнішніх впливів. З цією метою можуть використовуватися прості методи усереднення кількох послідовних значень. Це дозволяє зменшити вплив одиничних випадкових відхилень і отримати більш стабільний результат вимірювання.

У разі появи пропущених або некоректних значень система може використовувати останнє достовірне значення параметра або виконувати повторне зчитування. Такий підхід дозволяє уникнути розривів у часовому ряді вимірювань і забезпечує безперервність роботи системи. Додатково попередня обробка може включати приведення даних до формату, зручного для подальшого аналізу й оцінювання стану мікроклімату.

Після завершення етапу попередньої обробки формується узгоджений набір параметрів, який є основою для наступних процедур оцінювання стану середовища. Таким чином, метод збору та попередньої обробки даних забезпечує перехід від сирих сенсорних вимірювань до достовірної інформації, придатної для подальшого аналізу та прийняття рішень.

Отже, метод збору та попередньої обробки даних із сенсорів дозволяє забезпечити безперервне отримання основних параметрів мікроклімату, перевірку їхньої коректності та підготовку до подальшого оцінювання. Це створює основу для реалізації методів підвищення достовірності вимірювань, адаптивного збору даних і формування керуючих впливів у кіберфізичній системі моніторингу мікроклімату.

3.2 Метод фільтрації та підвищення достовірності вимірювань

У системах моніторингу мікроклімату підземних споруд подвійного призначення особливу роль відіграє точність вимірювань, оскільки навіть незначні відхилення параметрів внутрішнього середовища можуть впливати на безпечність перебування людей. У зв'язку з цим важливим завданням є удосконалення

процедур обробки вимірювальних даних, що дозволяють підвищити достовірність отриманої інформації та забезпечити коректне функціонування всієї кіберфізичної системи.

Процес обробки даних у розробленій системі включає кілька взаємопов'язаних етапів. На першому етапі здійснюється збір інформації з сенсорних модулів, що вимірюють температуру повітря, відносну вологість та показники якості повітря. Отримані значення можуть містити випадкові похибки та аномальні відхилення, що зумовлює необхідність їх подальшої обробки перед використанням для оцінювання стану мікроклімату.

Наступним етапом є попередня обробка даних, яка включає фільтрацію шуму та корекцію можливих похибок вимірювання. Це дозволяє усунути випадкові викиди й аномальні значення, що можуть виникати внаслідок електричних перешкод, нестабільної роботи сенсорів або різких короточасних змін умов навколишнього середовища. Використання фільтрації є необхідним для того, щоб результати моніторингу відображали реальний стан повітряного середовища, а не випадкові коливання сигналів.

Після очищення даних виконується їх аналіз шляхом порівняння з установленими допустимими межами. У разі виявлення відхилень система формує відповідні керуючі впливи або генерує повідомлення для користувача. Такий підхід забезпечує своєчасне реагування на зміну параметрів мікроклімату та створює основу для підтримання безпечних умов перебування людей в укритті.

Одним із найпростіших і водночас ефективних методів фільтрації є метод ковзного середнього [66-68]. Його використання дозволяє згладжувати короточасні коливання значень та зменшувати вплив випадкових похибок. Цей метод особливо корисний для обробки даних, які отримані за допомогою сенсорів або в умовах нестабільності, таких як підземні споруди. Якщо для певного параметра мікроклімату формується послідовність вимірювань

$$X_1, X_2, X_3, \dots, X_n, \quad (3.4)$$

то відфільтроване значення може бути визначене як середнє арифметичне кількох останніх вимірювань:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i, \quad (3.5)$$

де n – кількість значень, що враховуються під час усереднення.

Застосування методу ковзного середнього дозволяє згладжувати шумові коливання та отримувати більш стабільне значення параметра. Водночас вибір кількості вимірювань n безпосередньо впливає на характер фільтрації: при малих значеннях n система швидше реагує на зміну середовища, а при більших – забезпечує вищий рівень згладжування, але стає більш інерційною.

Метод не потребує зберігання всієї історії даних, що важливо для мікроконтролерів з обмеженою пам'яттю (наприклад, ESP32).

Зі збільшенням розміру вікна n підвищується рівень згладжування, але зростає інерційність системи (затримка реакції на зміни).

Переваги методу ковзного середнього:

- 1) простота реалізації, метод ковзного середнього є простим для розуміння та реалізації, не потребує складних обчислень чи додаткових параметрів;
- 2) ефективне згладжування випадкових коливань, ковзне середнє добре усуває випадкові спотворення та шумові коливання, що дозволяє отримувати більш стабільні результати в умовах нестабільних вимірювань;
- 3) покращення точності, він підвищує точність вимірювань, зменшуючи вплив одиничних коливань або помилок, що виникають через зовнішні перешкоди;
- 4) широке застосування.

Недоліки методу ковзного середнього:

- 1) втрата частини інформації, при використанні ковзного середнього деяка частина інформації може бути втрачена, оскільки для згладжування

використовуються лише останні значення, це може бути проблемою в тих випадках, де важлива динаміка змін параметрів;

2) погана реакція на різкі зміни, якщо у середовищі відбувається різка зміна параметрів (наприклад, різке підвищення температури або вологості), метод ковзного середнього може повільно реагувати на ці зміни, оскільки середнє значення враховує лише попередні вимірювання, що згладжують різкі відхилення;

3) залежність від вибору розміру вікна, розмір вікна для ковзного середнього може суттєво вплинути на результат. Занадто велике вікно може згладити дані занадто сильно, а занадто мале вікно не буде достатньо ефективним для фільтрації шумів.

Для підвищення достовірності вимірювань у системі також виконується перевірка отриманих значень на відповідність фізично можливим межам датчиків. Наприклад, температура, відносна вологість та показники якості повітря не повинні виходити за межі робочих діапазонів відповідних сенсорів. У разі виявлення явно некоректного значення воно не використовується для подальшого аналізу, а система може або звертатися до попереднього достовірного вимірювання, або виконувати повторне зчитування.

Додатково для виявлення різких аномальних стрибків може застосовуватися умова перевірки різниці між сусідніми вимірюваннями:

$$|X_i - X_{i-1}| > \Delta X_{max}, \quad (3.6)$$

де ΔX_{max} – максимально допустиме відхилення між двома послідовними вимірюваннями.

Якщо ця умова виконується, поточне значення розглядається як підозріле та потребує додаткової перевірки. Такий підхід дозволяє уникнути впливу поодиноких збоїв на загальний результат оцінювання.

Загальний вигляд фільтрації та підвищення достовірності вимірювань зображено на блок-схемі (рис. 3.4).

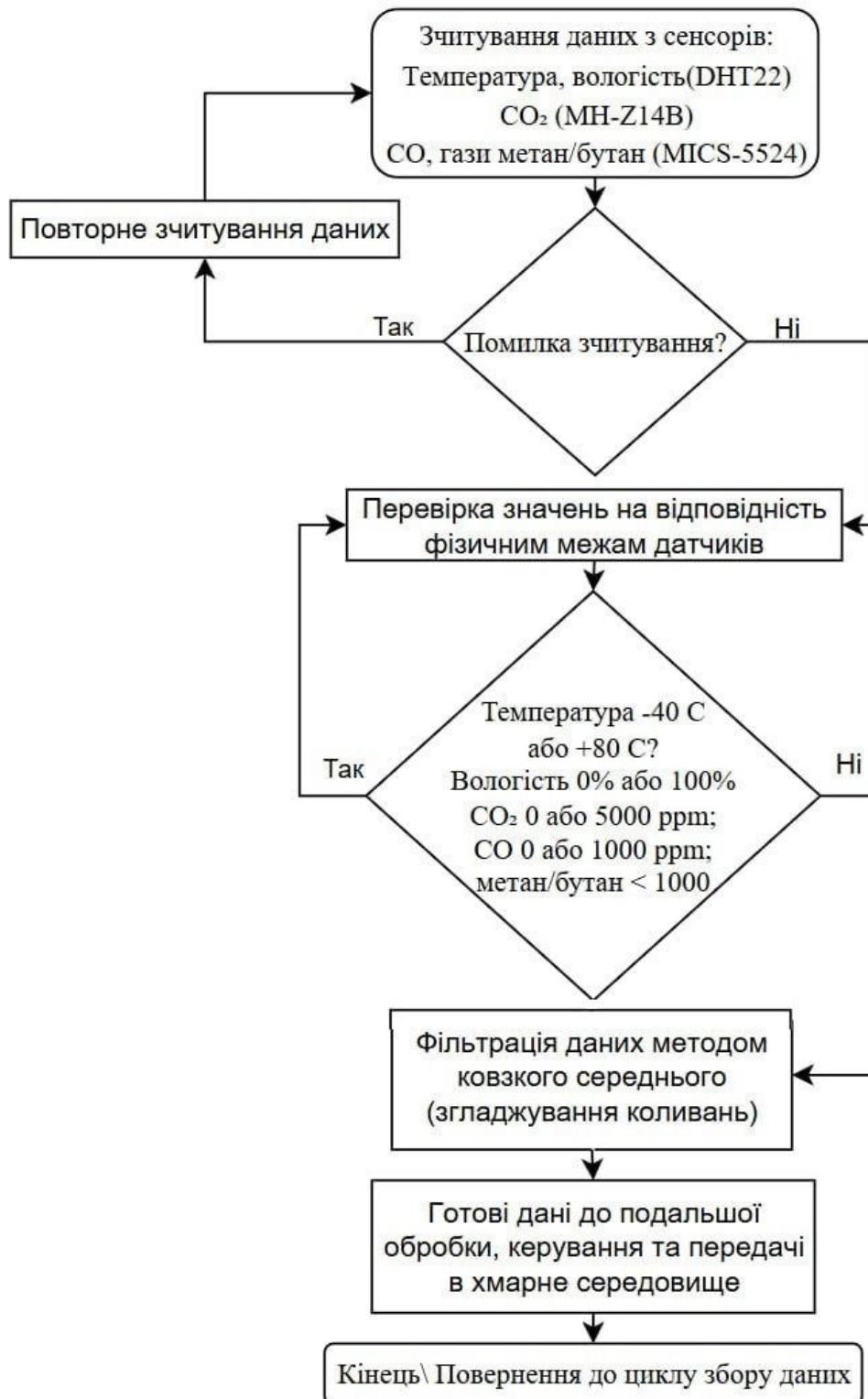


Рисунок 3.4 – Блок-схема фільтрації та підвищення достовірності вимірювань

На етапі збору даних з датчиків проводиться вимірювання температури, вологості та якості повітря за допомогою сенсорів. Перевірка коректності отриманих значень. (наприклад, чи знаходяться значення температури в межах

діапазону, чи є значення в межах 0-100% для вологості). Якщо дані не коректні, система виконує повторне зчитування або використовує попередні достовірні значення.

Попередня обробка даних: Після зчитування даних здійснюється їх фільтрація для усунення шуму. Перевірка значень на відповідність фізичним межам: температура не може бути меншою за -40°C або більшою за $+80^{\circ}\text{C}$, а вологість не може бути менше за 0% чи більше за 100%., CO_2 не може бути меншою за 0 або більшою за 5000 ppm; CO не може бути меншою 0 або більшою за 1000 ppm; метан/бутан < 1000) Далі застосовується метод ковзного середнього для згладжування коливань значень, та готові дані передаються для прийняття рішень.

Поєднання кількох методів фільтрації забезпечує підвищення точності вимірювань та стабільність отриманих результатів. Метод ковзного середнього є доцільним для згладжування короткочасних коливань, а перевірка коректності значень – для виключення явно помилкових даних. Разом ці процедури формують основу методу підвищення достовірності вимірювань у кіберфізичній системі моніторингу мікроклімату.

Запропонований метод є достатньо простим для реалізації на мікроконтролерній платформі ESP32, оскільки не потребує складних обчислювальних ресурсів. Це дозволяє виконувати обробку даних у реальному часі без суттєвого навантаження на систему, що є важливим для практичного використання в умовах підземних споруд подвійного призначення.

Таким чином, застосування фільтрації шумів, усереднення вимірювань, та перевірки значень на відповідність фізичним межам датчиків дозволяє суттєво підвищити достовірність інформації, зменшити вплив випадкових похибок та забезпечити ефективне функціонування системи моніторингу мікроклімату в підземних укриттях. Одним із подальших напрямів підвищення ефективності системи є впровадження адаптивних алгоритмів, які дозволяють змінювати параметри вимірювання залежно від поточного стану середовища.

3.3 Адаптивний метод вимірювання параметрів мікроклімату

Одним із найбільш ефективних напрямів підвищення якості моніторингу мікроклімату та енергоефективності кіберфізичної системи є використання адаптивних методів вимірювання параметрів. На відміну від традиційних підходів із фіксованою частотою збору даних, адаптивний метод передбачає зміну режиму вимірювання залежно від поточного стану середовища [69-75].

У системах моніторингу мікроклімату підземних споруд параметри внутрішнього середовища можуть змінюватися як повільно, так і досить динамічно. У стабільних умовах значення температури, вологості та якості повітря змінюються незначно, що не потребує частого опитування сенсорів. Водночас у разі виникнення змін (наприклад, збільшення кількості людей у приміщенні або погіршення вентиляції) параметри можуть змінюватися швидко, що потребує більш оперативного контролю.

З урахуванням цих особливостей доцільним є застосування адаптивного методу збору даних, який дозволяє змінювати частоту вимірювань залежно від динаміки зміни параметрів мікроклімату. Основна ідея такого підходу полягає в тому, що система аналізує попередні значення параметрів і на основі цього визначає необхідний інтервал до наступного вимірювання.

Нехай для кожного параметра мікроклімату формується послідовність значень: $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$, де X може відповідати температурі, вологості або показнику якості повітря.

Для оцінювання динаміки зміни параметра використовується різниця між двома послідовними вимірюваннями:

$$\Delta X = |X_i - X_{i-1}|. \quad (3.7)$$

На основі величини ΔX визначається режим роботи системи:

- якщо $\Delta X < \Delta X_{min}$, тобто зміни параметра є незначними, система переходить у режим зниженої частоти вимірювань;

- якщо ΔX знаходиться в межах допустимих значень, система працює в стандартному режимі;
- якщо $\Delta X > \Delta X_{max}$, тобто спостерігається різка зміна параметра, система переходить у режим підвищеної частоти вимірювань.

Відповідно до цього інтервал між вимірюваннями можна подати як функцію:

$$\tau = f(\Delta X), \quad (3.8)$$

де τ – інтервал часу між вимірюваннями.

Таким чином, у стабільних умовах, коли параметри мікроклімату практично не змінюються, інтервал τ збільшується, що дозволяє зменшити кількість звернень до сенсорів і знизити енергоспоживання системи. У випадку динамічних змін інтервал τ зменшується, що забезпечує більш частий збір даних і підвищує точність контролю.

Застосування адаптивного методу вимірювання дозволяє досягти балансу між точністю та енергоефективністю системи. З одного боку, забезпечується достатня деталізація змін параметрів мікроклімату у випадку нестабільних умов, а з іншого – зменшується навантаження на апаратну частину та споживання енергії при стабільному стані середовища.

Важливою особливістю є те, що адаптація частоти вимірювань може здійснюватися окремо для кожного параметра. Наприклад, температура змінюється відносно повільно, тому для неї може використовуватися більший інтервал вимірювання, тоді як показники якості повітря можуть змінюватися швидше і потребують більш частого контролю.

Реалізація адаптивного методу на мікроконтролері ESP32 не потребує значних обчислювальних ресурсів, оскільки базується на простих операціях порівняння та обчислення різниці між послідовними значеннями. Це дозволяє забезпечити роботу системи в реальному часі без значного навантаження на апаратні ресурси.

Таким чином, застосування адаптивного методу вимірювання параметрів мікроклімату дозволяє підвищити ефективність функціонування кіберфізичної системи, забезпечити більш точний контроль змін середовища та зменшити енергоспоживання. Отримані результати створюють основу для формування керуючих впливів та реалізації алгоритмів функціонування системи.

3.4 Метод формування керуючих впливів на вентиляцію та обігрів

У кіберфізичній системі моніторингу мікроклімату підземних споруд подвійного призначення формування керуючих впливів є завершальним етапом обробки даних, який забезпечує безпосередній вплив на параметри внутрішнього середовища. Розглянемо практичну реалізацію методу керування вентиляцією та обігрівом на основі аналізу поточних значень параметрів мікроклімату.

Метод формування керуючих впливів базується на результатах попередніх етапів обробки даних, зокрема фільтрації та оцінювання стану середовища. Вхідними даними є поточні значення температури, вологості та показника якості повітря, які пройшли попередню обробку та перевірку на достовірність.

У процесі реалізації методу використовується пороговий підхід, при якому кожному параметру відповідають допустимі межі. У разі виходу параметра за встановлені межі формується керуючий сигнал для відповідного виконавчого елемента.

Особливістю запропонованого методу є врахування інерційності зміни параметрів мікроклімату. Зокрема, температура та вологість змінюються поступово, тому система не реагує на одиничні відхилення, а враховує їх протягом кількох циклів вимірювання. Це дозволяє уникнути помилкового спрацювання виконавчих елементів.

Для реалізації цього підходу використовується механізм затримки прийняття рішення, при якому керуючий вплив формується лише у випадку, якщо відхилення параметра спостерігається протягом декількох послідовних вимірювань. Такий

підхід дозволяє підвищити стабільність роботи системи та зменшити кількість зайвих включень обладнання.

Додатково використовується принцип гістерезису, який передбачає наявність різних порогових значень для включення та вимкнення виконавчих пристроїв. Наприклад, обігрів може вмикатися при досягненні температури нижче мінімального значення, а вимикатися лише після досягнення дещо вищого рівня. Це дозволяє уникнути частого перемикавання обладнання при коливаннях параметрів поблизу граничних значень.

У випадку перевищення допустимих значень температури або погіршення якості повітря система формує сигнал на активацію вентиляції. При цьому інтенсивність роботи вентиляції може визначатися залежно від величини відхилення параметра від норми. Аналогічно, при зниженні температури нижче допустимого рівня активується система обігріву.

Важливою складовою методу є його взаємодія з адаптивним режимом вимірювання. У разі виявлення значних відхилень параметрів система не лише формує керуючі впливи, але й переходить у режим більш частого збору даних, що дозволяє оперативніше реагувати на зміни середовища.

Реалізація методу на мікроконтролері ESP32 передбачає використання цифрових виходів для керування релейними модулями або іншими виконавчими пристроями. Це забезпечує просту інтеграцію з системами вентиляції та обігріву та дозволяє реалізувати автоматичне керування в реальному часі.

Таким чином, запропонований метод формування керуючих впливів відрізняється від теоретичної моделі тим, що враховує особливості реальної роботи системи, зокрема інерційність процесів, необхідність фільтрації даних та запобігання частим перемиканням обладнання. Його застосування дозволяє підвищити надійність та ефективність функціонування кіберфізичної системи моніторингу мікроклімату.

3.5 Висновки

У розділі з метою подальшого розвитку методу моніторингу мікроклімату в підземних спорудах подвійного призначення було удосконалено метод адаптивного моніторингу параметрів мікроклімату. На відміну від існуючих рішень, цей метод включає використання змінного інтервалу вимірювань, що дозволяє підвищити точність контролю параметрів та знизити енергоспоживання системи.

Метод адаптивного моніторингу забезпечує гнучкість у зборі даних, адаптуючи частоту вимірювань до динаміки зміни параметрів середовища. Це дозволяє системі ефективно реагувати на різкі зміни умов у підземних спорудах та підтримувати стабільність мікроклімату. Враховуються також випадкові шуми та нестабільність вимірювань, що досягається шляхом використання процедур фільтрації та корекції даних перед їх аналізом. Це дозволяє підвищити точність оцінювання параметрів мікроклімату та забезпечити більш стабільну роботу системи в реальних умовах експлуатації.

Удосконалено також метод автоматичного керування виконавчими пристроями, що дозволяє на основі аналізу даних про параметри середовища своєчасно регулювати вентиляцію та обігрів. Цей підхід забезпечує підвищення оперативності реагування та стабільність підтримання оптимальних умов мікроклімату.

Отримані результати свідчать про те, що комплексне поєднання методу адаптивного моніторингу параметрів мікроклімату, метод фільтрації даних та метод автоматичного керування виконавчими пристроями забезпечують підвищення достовірності вимірювань, ефективності використання ресурсів та оперативності реагування на зміну параметрів мікроклімату. Це дозволяє розглядати розроблену кіберфізичну систему як ефективний засіб забезпечення безпечних умов перебування людей у підземних спорудах подвійного призначення.

4 РЕАЛІЗАЦІЯ КІБЕРФІЗИЧНОЇ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ ТА АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ЕКСПЕРИМЕНТІВ

4.1 Апаратна реалізація системи моніторингу мікроклімату

Апаратна реалізація кіберфізичної системи моніторингу мікроклімату в підземних спорудах подвійного призначення побудована за модульним принципом і включає сенсорні, обчислювальні, виконавчі та комунікаційні компоненти. Такий підхід забезпечує гнучкість системи, можливість її масштабування та адаптацію до різних умов експлуатації.

До складу системи входять сенсорні модулі, мікроконтролер, виконавчі пристрої, модулі індикації, а також елементи живлення та зв'язку. Взаємодія між цими компонентами забезпечує повний цикл функціонування системи – від збору даних до формування керуючих впливів і передачі інформації у віддалене середовище.

На рисунку 4.1 представлено структурну схему апаратної реалізації системи моніторингу мікроклімату.

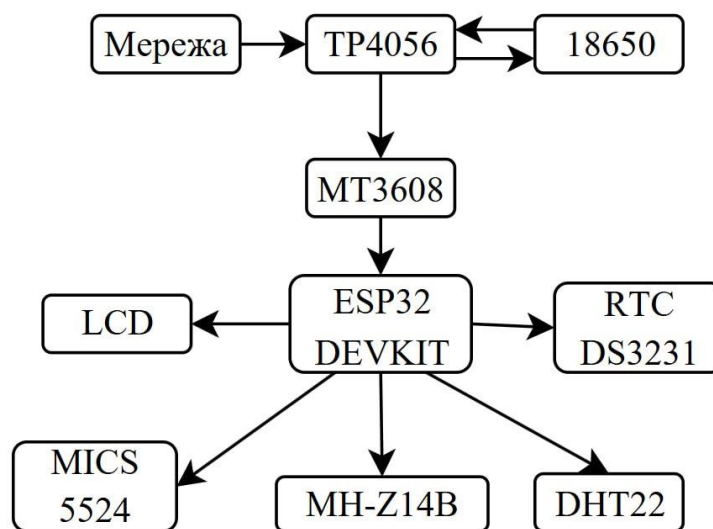


Рисунок 4.1 – Структурна схема системи моніторингу мікроклімату

Система складається з наступних основних функціональних рівнів:

- сенсорного рівня, який забезпечує вимірювання температури, вологості

- та якості повітря(вуглекислий газ, чадний газ та газів (метан, бутан);
- обчислювального рівня на базі мікроконтролера ESP32;
 - комунікаційного рівня, що реалізує передачу даних через Wi-Fi;
 - виконавчого рівня, який забезпечує керування параметрами мікроклімату;
 - рівня віддаленого моніторингу, реалізованого на основі хмарних сервісів.

Центральним елементом системи є мікроконтролер ESP32-DevKitC, який виконує функції збору, обробки та аналізу даних. Завдяки наявності вбудованого Wi-Fi модуля забезпечується можливість передачі інформації до віддалених сервісів у режимі реального часу.

Крім того, ESP32 підтримує необхідні інтерфейси для підключення сенсорів та інших периферійних пристроїв.

Для збору даних про стан мікроклімату використано кілька сенсорних модулів. Датчик DHT22 забезпечує вимірювання температури та відносної вологості повітря, що дозволяє отримувати значення температури, вологості.. Для вимірювання вуглекислого газу використовується датчик MH-Z19B.

Контроль чадного газу та газів (метан, бутан);здійснюється за допомогою сенсора MICS-5524, який реагує на зміну концентрації газів і дозволяє оцінювати рівень забруднення повітря.

Для відображення інформації використовується LCD дисплей – підключено через SPI інтерфейс (SCK до GPIO18, MOSI до GPIO23, CS до GPIO5, DC до GPIO16, RST до GPIO17). Це дозволяє реалізувати локальне відображення параметрів мікроклімату та стану системи.

Синхронізація часу в системі забезпечується модулем реального часу DS3231, який дозволяє точно фіксувати момент виконання вимірювань та забезпечує можливість ведення журналу даних.

Керування виконавчими пристроями здійснюється за допомогою драйвера L298N, який використовується для підключення вентиляторів або інших пристроїв регулювання мікроклімату. Це дозволяє автоматично реагувати на зміну

параметрів середовища та підтримувати їх у заданих межах.

Додатково в системі для візуальної індикації режимів роботи системи використано два світлодіоди. Зелений світлодіод підключено до GPIO14 і він сигналізує про нормальний режим функціонування системи. Червоний світлодіод підключено до GPIO32 і активується при ввімкненні вентиляції або виявленні відхилень параметрів мікроклімату від допустимих меж. Кожен світлодіод підключається через струмообмежувальний резистор, що забезпечує безпечний режим роботи виходів мікроконтролера.

Живлення системи організовано з використанням літійового акумулятора типу 18650, що забезпечує автономність роботи. Для керування процесом заряджання застосовується модуль TP4056, який забезпечує захист від перезаряду та глибокого розряду. Для стабілізації напруги використовується DC-DC перетворювач MT3608, який забезпечує необхідний рівень напруги для роботи всіх компонентів системи.

Для детального відображення взаємозв'язків між компонентами системи розроблено принципову електричну схему (рис. 4.2).

Як видно зі схеми, всі сенсорні модулі підключені безпосередньо до мікроконтролера ESP32, який здійснює їх опитування. Аналогові сигнали з датчика MICS-5524 обробляються за допомогою вбудованого аналого-цифрового перетворювача мікроконтролера. Обмін даними з дисплеєм і модулем реального часу здійснюється через SPI інтерфейс.

Живлення системи організовано з використанням літій-іонних акумуляторів типу 18650, модуля TP4056 для заряджання та захисту акумуляторів, а також перетворювача LM2596 для стабілізації напруги. Така побудова електричної схеми дозволяє забезпечити як стаціонарний, так і автономний режим функціонування системи, що є особливо важливим для використання в підземних спорудах подвійного призначення.

Таким чином, розроблена апаратна реалізація забезпечує інтеграцію всіх необхідних компонентів для побудови кіберфізичної системи моніторингу мікроклімату, яка здатна виконувати безперервний контроль параметрів середовища, передавати дані у віддалене середовище та автоматично реагувати на

їх зміну.

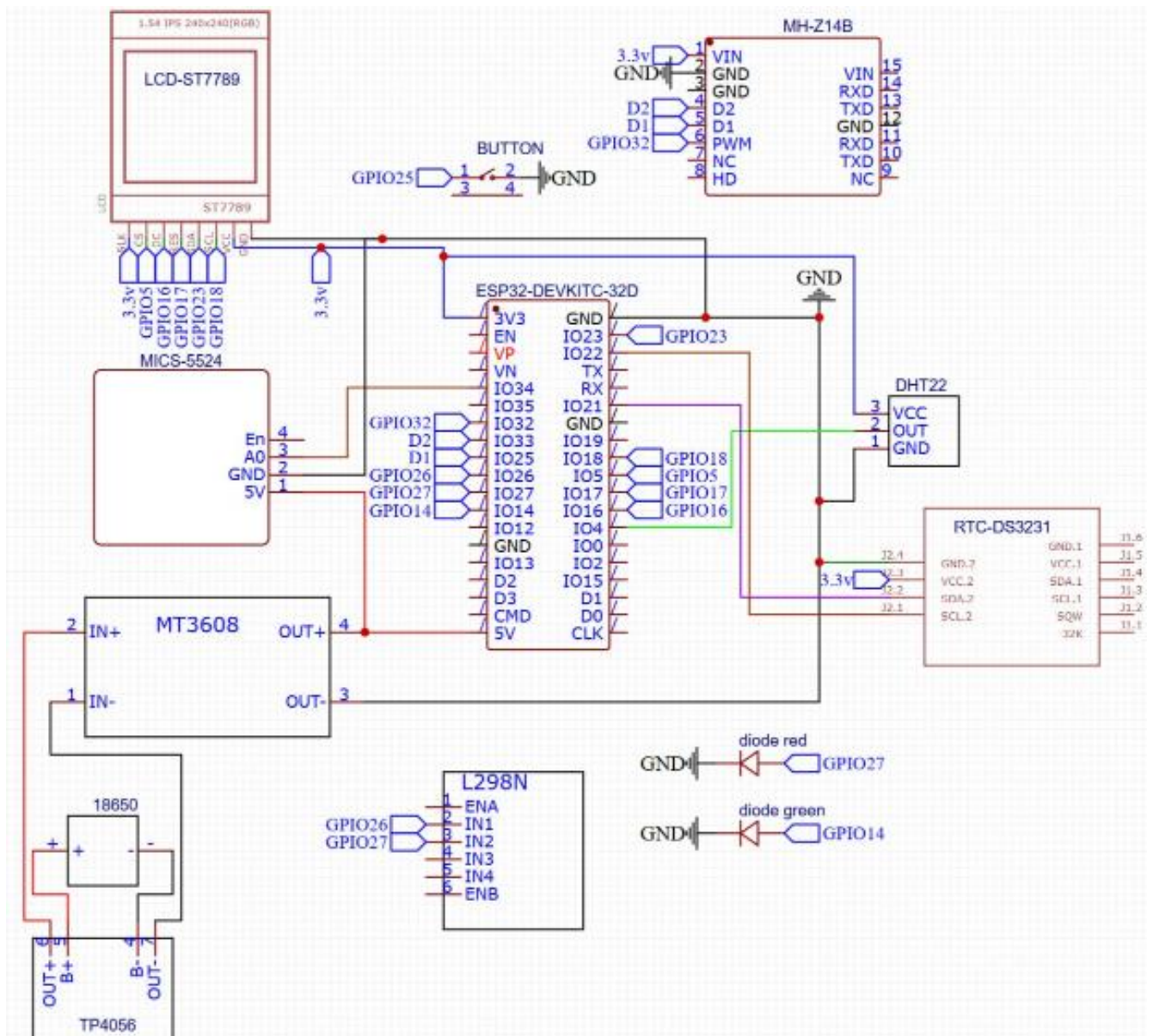


Рисунок 4.2 – Принципова електрична схема кіберфізичної системи моніторингу мікроклімату

При розробці електричної схеми особливу увагу приділено організації заземлення, розподілу живлення між модулями та узгодженню рівнів напруги між компонентами. Це дозволяє мінімізувати вплив перешкод, підвищити стабільність зчитування даних та забезпечити надійну роботу всієї системи в цілому.

Таким чином, розроблена електрична схема забезпечує узгоджену роботу сенсорних, обчислювальних, інтерфейсних і виконавчих елементів системи та є

основою для практичної реалізації кіберфізичної системи моніторингу мікроклімату.

4.2 Алгоритм функціонування кіберфізичної системи

Алгоритм функціонування розробленої кіберфізичної системи моніторингу мікроклімату реалізовано у вигляді послідовності взаємопов'язаних етапів, що забезпечують збір, обробку, аналіз та передачу даних, а також формування керуючих впливів для підтримання параметрів середовища в допустимих межах.

Алгоритм функціонування системи представлено у вигляді блок-схеми (рис. 4.3).

Після подачі живлення система переходить до етапу ініціалізації апаратних компонентів, зокрема сенсорних модулів для вимірювання температури, відносної вологості та показників якості повітря. Одночасно здійснюється налаштування бездротового з'єднання Wi-Fi, що забезпечує можливість передачі даних до віддаленого середовища.

Далі виконується збір даних із сенсорів. Отримуються значення температури, вологості та якості повітря, які передаються для подальшої обробки.

На наступному етапі здійснюється перевірка коректності зчитаних даних. У разі виникнення помилки система формує повідомлення для користувача та виконує повторну спробу зчитування, що підвищує надійність роботи системи.

Якщо дані є коректними, вони передаються на етап попередньої обробки, який включає фільтрацію та згладжування значень за допомогою методу ковзного середнього. Після фільтрації система виконує перевірку значень на відповідність допустимим фізичним межах (наприклад, температура повинна бути в межах від -40°C до $+80^{\circ}\text{C}$, вологість не менше за 0% або більше за 100%).

Для покращення енергоефективності та точності контролю, система застосовує адаптивний метод вимірювання. В залежності від динаміки зміни параметрів середовища, система автоматично регулює частоту вимірювань: Якщо зміни незначні, інтервал вимірювань збільшується (знижене енергоспоживання).

Якщо зміни значні, частота вимірювань зменшується для точнішого контролю.

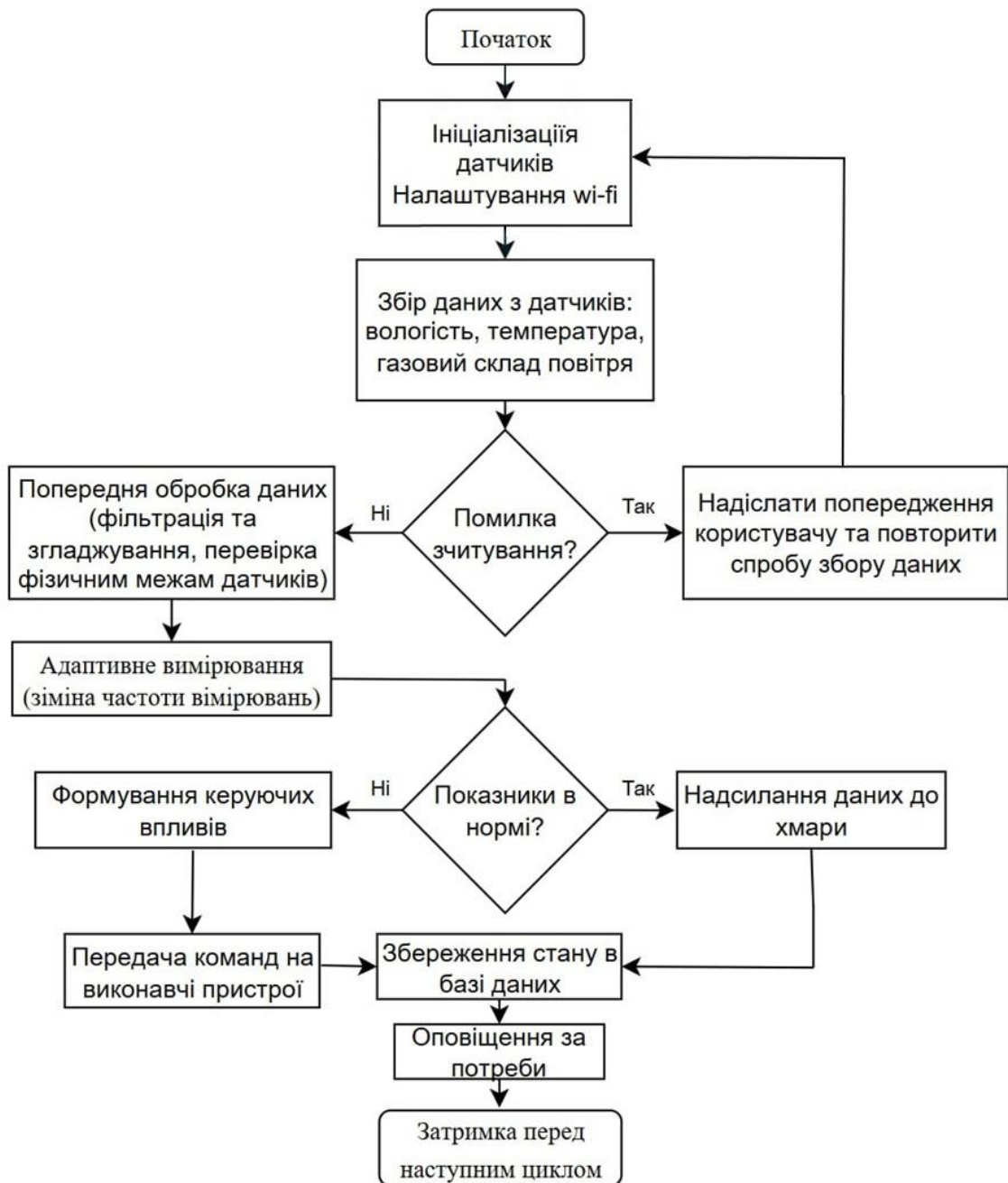


Рисунок 4.3 – Блок-схема алгоритму функціонування кіберфізичної системи

Після обробки виконується порівняння отриманих значень із заданими нормативними або граничними межами. Це дозволяє визначити, чи відповідають параметри мікроклімату допустимим умовам.

Якщо показники знаходяться в межах норми, система здійснює передачу даних до хмарного середовища, де вони зберігаються для подальшого аналізу, а

також виконується запис поточного стану в базу даних.

У разі, якщо хоча б один із параметрів виходить за допустимі межі, система переходить до етапу формування керуючих впливів. На основі характеру відхилення формуються команди для виконавчих пристроїв. Зокрема, при зниженні температури активується система обігріву, а при перевищенні температури або погіршенні якості повітря – система вентиляції.

Після формування керуючих сигналів здійснюється передача команд на виконавчі пристрої та збереження поточного стану параметрів у базі даних. У разі необхідності система формує повідомлення для користувача.

Як показано на блок-схемі, після виконання основних операцій реалізується адаптивна зміна інтервалу вимірювання. У стабільних умовах інтервал між вимірюваннями збільшується для зниження енергоспоживання, а при зміні параметрів – зменшується для забезпечення більш точного контролю.

Після цього система переходить у режим очікування на визначений інтервал часу, після чого цикл роботи повторюється. Такий підхід забезпечує безперервний моніторинг параметрів мікроклімату.

Таким чином, розроблений алгоритм повністю відповідає представленій блок-схемі та забезпечує ефективне функціонування кіберфізичної системи моніторингу мікроклімату в підземних спорудах подвійного призначення.

4.3 Програмна реалізація системи моніторингу мікроклімату

Програмна реалізація кіберфізичної системи моніторингу мікроклімату передбачає інтеграцію апаратних компонентів системи, збору та обробки даних з сенсорів, а також формування керуючих сигналів для забезпечення оптимальних параметрів мікроклімату. Система реалізована на базі мікроконтролера ESP32, що забезпечує зручність інтеграції і налаштування.

Алгоритм роботи системи включає кілька етапів:

1. Ініціалізація апаратних компонентів:
 - підключення до сенсорів (DHT22, MICS-5524, MH-Z19B);

- ініціалізація мікроконтролера ESP32 та налаштування виходів для керування виконавчими пристроями (вентиляція, обігрів);

- підключення до бездротової мережі (Wi-Fi) для передачі даних у хмарне середовище.

2. Збір даних:

- читання даних з кожного сенсора через відповідні інтерфейси (I2C, SPI, аналогові виходи);

- перевірка коректності отриманих значень і виявлення помилок, таких як аномальні значення або відсутність з'єднання.

3. Попередня обробка даних:

- фільтрація шумів за допомогою середнього фільтрування для згладжування короточасних коливань;

- усунення аномальних значень через порогові перевірки та порівняння з мінімальними і максимальними дозволеними значеннями.

4. Адаптивне вимірювання. Для підвищення енергоефективності та точності моніторингу, система використовує адаптивний метод вимірювання, що залежить від стабільності параметрів середовища.

5. Аналіз даних та порівняння з пороговими значеннями:

- порівняння температури, вологості та якості повітря з встановленими нормами;

- формування керуючого сигналу для виконавчих пристроїв при перевищенні меж.

6. Керування виконавчими пристроями:

- якщо температура занадто низька ($<10^{\circ}\text{C}$), активуються системи обігріву;

- якщо температура $>26^{\circ}\text{C}$, активується вентиляція;

- при перевищенні вологості або погіршенні якості повітря активується вентиляція.

7. Передача даних у хмару:

- формування пакету даних про стан мікроклімату та його передача на віддалений сервер або в базу даних;
- створення журналу вимірювань для подальшого аналізу та моніторингу з будь-якого місця.

8. Повторення циклу:

- після виконання всіх етапів система повертається до збору нових даних, знову перевіряючи та обробляючи параметри.

Програмна частина системи реалізована на мікроконтролері ESP32, який відповідає за зчитування даних з сенсорів, їх обробку, порівняння з допустимими межами та автоматичне керування виконавчими пристроями, такими як вентиляція та обігрів. Для фільтрації даних використовується метод ковзного середнього, а для адаптивного вимірювання – алгоритм змінювання інтервалу вимірювань залежно від стабільності параметрів мікроклімату. Повний лістинг коду наведено в Додатку Г.

Розглянемо більш детально адаптивний інтервал вимірювань та його реалізацію в коді. Адаптивний інтервал вимірювань є важливим елементом розробленої системи, який дозволяє оптимізувати її роботу за рахунок зниження енергоспоживання без втрати достовірності контролю параметрів мікроклімату. На відміну від систем із фіксованим періодом опитування сенсорів, запропонований підхід передбачає автоматичну зміну інтервалу між вимірюваннями залежно від поточного стану середовища.

Фрагмент коду для адаптивного інтервалу вимірювань:

```
// Перевірка зміни значень
    if (abs(temperature - lastTemperature) > 1 ||
        abs(humidity - lastHumidity) > 1.0 ||
        abs(co2 - lastCo2) > 50 ||      // Перевірка для CO2
        abs(methane - lastMethane) > 1.0 ||
        abs(butane - lastButane) > 1.0) {
        stableReadingsCount = 0;
        measurementInterval = 30000; // 30 секунд
    } else {
```

```
        stableReadingsCount++;  
    }  
  
    // Перехід в адаптивний режим після 3 стабільних вимірювань  
    if (stableReadingsCount >= 3) {  
        measurementInterval = 60000; // 60 секунд  
    }
```

У стандартному режимі система виконує вимірювання через кожні 30 секунд. Після кожного циклу опитування отримані значення температури, відносної вологості та показника якості повітря порівнюються з попередніми результатами. Якщо різниця між вимірюваннями перевищує встановлені порогові значення (наприклад, 1 °С для температури, 1,0 % для вологості або 50 умовних одиниць для показника якості повітря), система продовжує працювати у стандартному режимі з інтервалом 30 секунд, що забезпечує оперативне реагування на зміну умов середовища.

Якщо протягом трьох послідовних вимірювань параметри залишаються стабільними та не демонструють суттєвих відхилень, система автоматично переходить в адаптивний режим роботи, у якому інтервал між вимірюваннями збільшується до 60 секунд. Це дозволяє зменшити навантаження на мікроконтролер, скоротити кількість звернень до сенсорів та знизити енергоспоживання системи.

У разі виявлення нових змін параметрів у адаптивному режимі система автоматично повертається до стандартного режиму вимірювань із інтервалом 30 секунд.

Логіка адаптивного вимірювання забезпечує компроміс між швидкістю та енергоефективністю системи. При динамічних змінах середовища підтримується висока частота контролю, а в умовах стабільного мікроклімату зменшується частота опитування сенсорів.

Переваги адаптивного підходу:

- енергоефективність – зменшення частоти вимірювань у стабільних умовах;

- оперативність контролю – швидке реагування при зміні параметрів середовища;
- гнучкість – автоматичне підлаштування режиму роботи до поточних умов;
- підвищення ресурсу системи – зниження навантаження на апаратні компоненти.

Виходячи з описаного підходу, у програмному забезпеченні реалізовано таку послідовність роботи системи:

1. Ініціалізація сенсорів та допоміжних модулів.
2. Зчитування параметрів температури, вологості та якості повітря.
3. Фільтрація та корекція даних за допомогою усереднення.
4. Оцінювання стабільності середовища:
 - якщо параметри стабільні – інтервал вимірювань збільшується до 60 с;
 - якщо параметри змінюються – використовується стандартний інтервал 30 с.
5. Формування керуючих сигналів для вентиляції або обігріву.
6. Передача даних у хмарне середовище для віддаленого моніторингу.

Програмна реалізація системи моніторингу мікроклімату на базі мікроконтролера ESP32 забезпечує ефективний збір, обробку та контроль параметрів внутрішнього середовища в режимі реального часу. Завдяки застосуванню адаптивного методу вимірювання та алгоритмів фільтрації даних досягається необхідна точність контролю сенсорних показників і підвищується стабільність роботи системи.

У стандартному режимі система виконує вимірювання з інтервалом 30 секунд, що дозволяє своєчасно відстежувати зміни параметрів мікроклімату. За умови стабільності показників протягом трьох послідовних циклів опитування система автоматично переходить у режим енергозбереження зі збільшеним інтервалом вимірювань до 60 секунд. Це сприяє зниженню енергоспоживання та підвищенню тривалості автономної роботи.

У разі виявлення змін параметрів середовища система автоматично повертається до стандартного режиму з частішим контролем, що забезпечує оперативне реагування на відхилення температури, вологості або якості повітря. Такий підхід робить розроблену систему ефективною, надійною та придатною для тривалого використання в підземних спорудах подвійного призначення та захисних укриттях.

4.4 Хмарний моніторинг та передача даних

Хмарна технологія дозволяє забезпечити віддалений доступ до інформації про стан мікроклімату в реальному часі, а також зберігати історію вимірювань для подальшого аналізу та оптимізації роботи системи.

Для передачі даних у хмару було використано Wi-Fi з'єднання через мікроконтролер ESP32, що забезпечує стабільний зв'язок з віддаленим сервером. Хмарна платформа для зберігання та обробки даних може бути будь-яка, наприклад, Google Firebase, ThingSpeak або інші платформи для Інтернету речей (IoT).

У цьому випадку мікроконтролер ESP32 здійснює підключення до Wi-Fi, а потім передає отримані дані на сервер за допомогою HTTP-запитів або MQTT.

Передача даних в хмару відбувається у вигляді JSON-пакетів, що містять інформацію про параметри мікроклімату та час вимірювання:

```
{
  "temperature": 22.4,
  "humidity": 45.3,
  "air_quality": 300,
  "timestamp": "2026-04-29 14:30:00"
}
```

Цей пакет передається в хмару для подальшого зберігання та аналізу. Дані, що передаються в хмару, зберігаються у базі даних. Вони можуть бути проаналізовані для виявлення тенденцій (наприклад, сезонні зміни температури або вологості) та візуалізовані у вигляді графіків або діаграм для зручного моніторингу.

Для аналізу даних можна використовувати платформи, які підтримують розширену аналітику. Завдяки хмарному зберіганню даних користувач може отримувати доступ до інформації про стан мікроклімату в реальному часі з будь-якої точки світу. Це дозволяє своєчасно реагувати на зміну умов середовища та мити історію вимірювань для подальшого аналізу.

Для реалізації віддаленого доступу можна використовувати мобільні додатки або веб-платформи, що надають зручний інтерфейс для перегляду даних у реальному часі.

Хмарний моніторинг та передача даних дозволяють отримати доступ до результатів вимірювань в реальному часі з будь-якої точки світу. Це важливо для підтримки належних умов мікроклімату в підземних спорудах подвійного призначення, де необхідно постійно контролювати параметри середовища. Передача даних у хмару забезпечує збереження історії вимірювань і створює можливість для подальшого аналізу та вдосконалення системи.

4.5 Методика проведення експериментальних досліджень

Для підтвердження працездатності розробленої кіберфізичної системи моніторингу мікроклімату в підземних спорудах подвійного призначення було проведено комплекс експериментальних досліджень. Метою експериментів є перевірка точності вимірювання параметрів мікроклімату, стабільності функціонування системи, швидкодії реагування на зміну умов середовища, а також оцінка ефективності реалізованих алгоритмів обробки даних і автоматичного керування.

Для проведення досліджень було створено лабораторний прототип кіберфізичної системи, до складу якого входили мікроконтролер ESP32, датчик температури та вологості DHT22, датчик MICS-5524 (CO, газ метан та бутан), датчик визначення вуглекислого газу MH-Z19B, релейний модуль керування виконавчими механізмами та блок живлення. Перед початком експериментів

виконано перевірку правильності підключення компонентів, калібрування сенсорів та тестування обміну даними між модулями.

Методика досліджень передбачала проведення випробувань у декількох режимах роботи системи:

1. Перевірка точності вимірювання температури та вологості. Показники датчика DHT22 порівнювалися з контрольним побутовим термогігрометром. Вимірювання проводилися у стабільних умовах приміщення протягом 30 хвилин з інтервалом 30 секунд. За результатами визначалась середня похибка вимірювання.

2. Дослідження реакції системи на зміну температури. Для моделювання зміни температури сенсор розміщувався поблизу джерела тепла. Фіксувався час реакції системи від моменту зміни температури до оновлення показників та спрацювання алгоритму керування.

3. Дослідження реакції системи на зміну вологості. Зміна вологості створювалась штучно шляхом розміщення джерела вологи поблизу сенсора. Аналізувалась швидкість оновлення даних та стабільність показників після застосування методу ковзного середнього.

4. Перевірка роботи датчика MICS-5524. Для тестування датчика використовувалося короткочасне введення газу з балончика для заправки запальничок, що містить бутан, у контрольованій кількості на безпечній відстані від сенсора. Це дозволило перевірити здатність датчика фіксувати зміни сигналу та реагувати на перевищення встановлених порогових значень для газу.

5. Для тестування датчика MH-Z19B, що вимірює вуглекислий газ (CO_2), проводилось подавання CO_2 через трубку в замкнений простір, створений для тестування. Це дозволяло моделювати підвищення рівня CO_2 , що виникає внаслідок видиху людини. Трубка підводила газ до датчика, забезпечуючи зміну концентрації CO_2 у контрольованих умовах. Тестування проводилось шляхом поступового подавання газу для оцінки реакції датчика та перевірки точності вимірювань.

6. Оцінка адаптивного режиму вимірювань. У стандартному режимі система виконувала вимірювання через кожні 30 секунд. Якщо протягом трьох

послідовних циклів опитування параметри залишалися стабільними, система автоматично переходила в адаптивний режим, у якому інтервал між вимірюваннями збільшувався до 60 секунд. У разі виявлення змін система поверталася до стандартного режиму. Під час експерименту оцінювалась доцільність такого алгоритму з точки зору оперативності контролю та енергоспоживання.

7. Перевірка формування керуючого впливу на виконавчі механізми. У процесі досліджень перевірялась здатність системи автоматично формувати сигнали керування для зовнішніх пристроїв залежно від поточного стану мікроклімату. Як виконавчі механізми використовувалися вентиляція та система обігріву.

При перевищенні допустимого значення температури або погіршенні якості повітря система подавала сигнал на ввімкнення вентиляції. У разі зниження температури нижче допустимого рівня формувався сигнал на активацію обігріву. Після повернення параметрів до нормативного діапазону виконавчі пристрої автоматично вимикалися.

Під час випробувань контролювалися час спрацювання, коректність перемикання режимів та відсутність хибних спрацювань.

8. Перевірка безперервності роботи системи. Система працювала у безперервному режимі протягом 24 годин. Контролювались можливі збої, зависання мікроконтролера, помилки передавання даних та стабільність живлення.

Усі результати експериментів фіксувалися у вигляді таблиць, журналу спостережень та графіків зміни параметрів у часі, що дозволило провести подальший аналіз точності роботи системи, швидкості реагування та ефективності програмних алгоритмів.

За результатами проведених досліджень встановлено що:

- система забезпечує достатню точність вимірювання параметрів мікроклімату;
- адаптивний режим вимірювань дозволяє знизити енергоспоживання системи у стабільних умовах;

- система оперативно реагує на зміну температури та якості повітря;
- автоматичне керування вентиляцією та обігрівом працює коректно та стабільно.

Отже, експериментальні дослідження підтвердили, що запропонована система моніторингу мікроклімату є ефективною для використання в підземних спорудах подвійного призначення та здатна підтримувати комфортні й безпечні умови перебування людей у реальному часі.

4.6 Аналіз результатів роботи системи

Після завершення експериментальних досліджень було виконано аналіз отриманих результатів з метою оцінки ефективності роботи розробленої кіберфізичної системи моніторингу мікроклімату в підземних спорудах подвійного призначення. Основну увагу приділено точності вимірювань, стабільності функціонування, роботі адаптивного алгоритму вимірювань, коректності керування виконавчими механізмами та загальній надійності системи.

Під час перевірки точності вимірювання температури та відносної вологості показники датчика DHT22 порівнювались із контрольним термогігрометром. У ході досліджень встановлено, що середня похибка вимірювання температури не перевищувала $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$, а відносної вологості – $\pm 2,5\%$. Отримані значення є допустимими для задач оперативного моніторингу мікроклімату в укриттях та закритих приміщеннях.

Поєднання кількох методів фільтрації забезпечує підвищення точності вимірювань та стабільність отриманих результатів. Застосування алгоритму ковзного середнього позитивно вплинуло на стабільність показників сенсорів. Після фільтрації випадкові коливання значень температури та вологості зменшилися, а відображення даних стало більш плавним та інформативним. Це підвищило достовірність прийняття рішень системою керування та зменшило ймовірність хибних спрацювань.

У процесі дослідження роботи адаптивного алгоритму встановлено, що у стандартному режимі система виконувала вимірювання через кожні 30 секунд. Якщо протягом трьох послідовних вимірювань параметри середовища залишалися стабільними та не перевищували заданих порогових значень, система автоматично переходила в адаптивний режим, у якому інтервал між вимірюваннями збільшувався до 60 секунд. У разі виявлення змін показників система поверталася до стандартного режиму роботи. Використання такого підходу дозволило зменшити кількість зайвих вимірювань та скоротити енергоспоживання без втрати якості контролю.

Дослідження роботи датчика якості повітря MICS-5524 підтвердило його здатність фіксувати погіршення стану повітря у замкненому просторі. При зростанні концентрації бутану система реєструвала перевищення порогового значення та ініціювала відповідне попередження. Це дозволяє використовувати систему для раннього виявлення погіршення вентиляції або накопичення небезпечних газів.

Окрему увагу приділено перевірці роботи підсистеми автоматичного керування. Під час експериментів система коректно формувала сигнали керування виконавчими механізмами залежно від поточних показників мікроклімату. При перевищенні температури понад 26°C або погіршенні якості повітря активувалася вентиляція. У разі зниження температури нижче 10°C система вмикала обігрів. Після повернення параметрів у допустимі межі обладнання автоматично вимикалося. Помилкових спрацювань у ході досліджень не зафіксовано.

Під час тестування безперервної роботи протягом 24 годин система функціонувала стабільно. Зависань мікроконтролера, збоїв обміну даними чи втрати зв'язку між модулями не виявлено. Це свідчить про достатній рівень надійності апаратно-програмної реалізації.

Результати порівняння стандартного та адаптивного режимів роботи наведено у таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Порівняння режимів функціонування системи

Параметр	Стандартний режим	Адаптивний режим
Інтервал вимірювань	30 с	60 с
Частота опитування сенсорів	постійна	змінна
Кількість вимірювань за добу	2880	1440
Добове енергоспоживання	вище	нижче на 15–20 %
Ефективність реагування	середня	висока

Як видно з таблиці, застосування адаптивного режиму дозволило зменшити кількість зайвих вимірювань та знизити добове енергоспоживання системи. Одночасно забезпечується стабільний контроль параметрів мікроклімату та раціональне використання ресурсів апаратної частини системи.

Таким чином, результати експериментальних досліджень підтвердили працездатність, ефективність та доцільність використання розробленої кіберфізичної системи моніторингу мікроклімату в підземних спорудах подвійного призначення.

Для наочності на рисунку 4.4 наведено зміну рівня заряду акумулятора під час роботи системи протягом 24 годин у стандартному та адаптивному режимах функціонування. У стандартному режимі вимірювання параметрів здійснюються через фіксований інтервал часу, що призводить до більш інтенсивного використання енергетичних ресурсів. В адаптивному режимі система автоматично змінює частоту опитування датчиків залежно від стабільності параметрів мікроклімату.

З графіка видно, що після 24 годин безперервної роботи залишковий заряд акумулятора у стандартному режимі становить 68%, тоді як в адаптивному режимі – 79%. Це свідчить про зниження енергоспоживання завдяки використанню інтелектуального алгоритму керування частотою вимірювань.

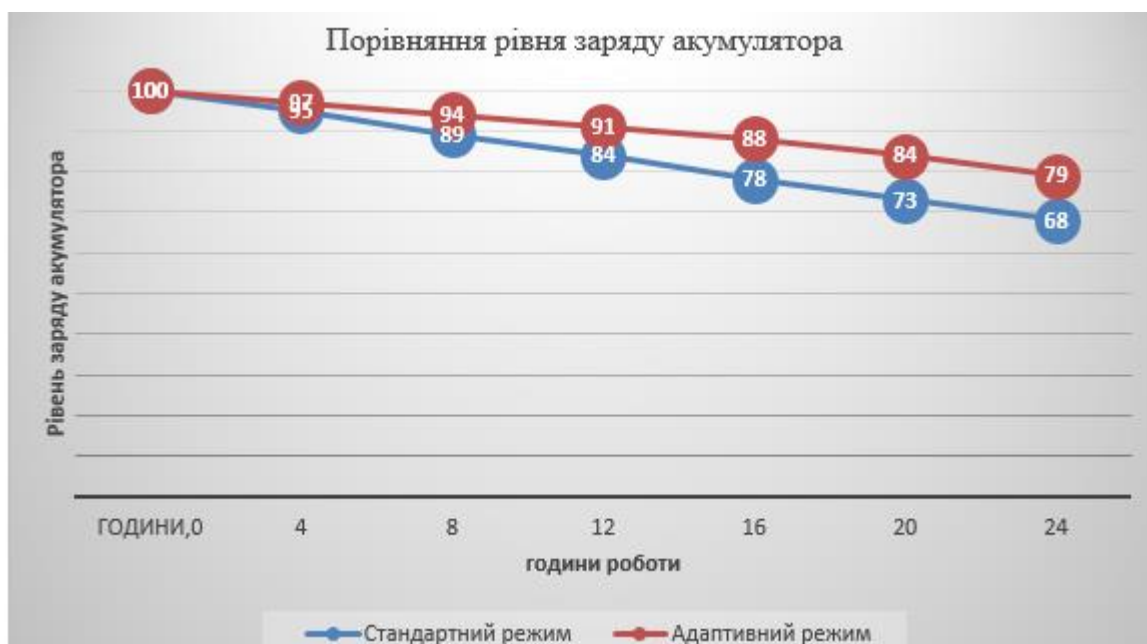


Рисунок 4.3 – Порівняння витрат енергії в різних режимах роботи

Отримані результати підтверджують, що застосування адаптивного режиму дозволяє збільшити тривалість автономної роботи системи, що є особливо важливим для експлуатації у підземних спорудах та укриттях за умов обмеженого електроживлення.

Результати експериментальних досліджень підтвердили працездатність запропонованої кіберфізичної системи, доцільність застосування автоматичного керування вентиляцією й обігрівом. Розроблена система може бути використана як основа для створення інтелектуальних засобів забезпечення нормативного мікроклімату в укриттях та інших підземних спорудах.

4.7 Висновки

У даному розділі магістерської роботи виконано практичну реалізацію кіберфізичної системи моніторингу мікроклімату для підземних споруд подвійного призначення та проведено експериментальне дослідження її функціонування.

У процесі роботи розроблено апаратну частину системи на базі мікроконтролера ESP32 із використанням датчиків температури, відносної вологості, вуглекислого газу та якості повітря, а також модулів індикації й

керування виконавчими механізмами. Створено програмне забезпечення, яке забезпечує збір, обробку, відображення та передавання даних у режимі реального часу.

За результатами експериментальних досліджень підтверджено достатню точність вимірювання параметрів, стабільність функціонування системи протягом тривалого часу та коректність формування керуючих сигналів для вентиляції й обігріву. Встановлено, що використання адаптивного режиму роботи забезпечує зниження добового енергоспоживання приблизно на 15–20% порівняно зі стандартним режимом.

Отримані результати підтверджують практичну доцільність застосування розробленої кіберфізичної системи для контролю та підтримання нормативних параметрів мікроклімату в укриттях і підземних спорудах подвійного призначення.

ВИСНОВКИ

У роботі за результатами виконаних теоретичних та практичних досліджень набув подальшого розвитку метод моніторингу мікроклімату в підземних спорудах подвійного призначення. Запропонована система дозволяє здійснювати комплексний контроль, враховує наявність випадкових шумів та нестабільність вимірювань, що досягається шляхом використання процедур фільтрації, а також реалізує адаптивну зміну інтервалу вимірювання залежно від стану середовища та забезпечує автоматичне керування вентиляцією та обігрівом на основі аналізу параметрів середовища.

Поставлену мету досягнуто шляхом розв'язання таких основних завдань:

- проаналізовано існуючі методи та засоби контролю параметрів мікроклімату в укриттях і підземних спорудах;
- досліджено сучасні підходи до побудови кіберфізичних систем моніторингу;
- розроблено структурну схему кіберфізичної системи моніторингу мікроклімату;
- поєднано алгоритми збору, обробки та фільтрації даних сенсорів;
- реалізовано метод адаптивного опитування датчиків для зменшення енергоспоживання;
- реалізовано автоматичне керування вентиляцією та обігрівом залежно від стану середовища;
- проведено експериментальні дослідження працездатності та ефективності запропонованої системи.

Практична значимість отриманих результатів полягає у створенні ефективної кіберфізичної системи для автоматизованого моніторингу мікроклімату, що може бути використана в укриттях та підземних спорудах подвійного призначення. Розроблене програмне забезпечення дозволяє в реальному часі контролювати параметри середовища, оптимізувати енергоспоживання і забезпечувати безпечні умови перебування людей.

Розроблений метод адаптивного моніторингу уможливив оптимізацію продуктивності кіберфізичних систем моніторингу мікроклімату в підземних спорудах подвійного призначення, що дозволило знизити енергоспоживання на 15-20% завдяки використанню адаптивного інтервалу вимірювань. Замість постійного опитування датчиків через 30 секунд, система автоматично переходить у режим з інтервалом 60 секунд після трьох стабільних вимірювань, що забезпечує економію енергії без втрати точності контролю параметрів мікроклімату. Така оптимізація покращує загальну ефективність роботи системи, знижуючи навантаження на апаратні компоненти та збільшуючи тривалість автономної роботи.

За темою кваліфікаційної роботи опубліковані тези у Збірнику матеріалів 17ї науково-технічної конференції «Перспективні мережеві та комп'ютерні технології» ПерСиК 2026 23 квітня 2026, Харків, Україна. та у збірнику матеріалів VII Міжнародної науково-практичної конференції молодих вчених, аспірантів і студентів «Сучасні інформаційні технології та системи в управлінні» 28-29 квітня 2026 р., Київ, Україна.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Воропаєва А. О., Романюк А. М. Обґрунтування механізмів та методів розробки автоматизованої системи керування мікрокліматом в захисних спорудах. *Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Обчислювальна техніка та автоматизація*. 2024. № 1 (34). С. 142–153.
2. Report on Electronic Warfare Countermeasures. *NATO Science & Technology Organization*. 2023. 84 p
3. Гасенко А. В., Гасенко Л. В., Слонь В. В., Дарієнко В. В. До визначення потреби у сховищах цивільного захисту в існуючих житлових масивах. *Таврійський науковий вісник. Серія: Технічні науки*. 2025. № 1. С. 551–559. URL: <https://www.researchgate.net/publication/391749315> (дата звернення: 25.02.2026).
4. Панкевич О. Д., Паламарчук О. М. Забезпечення параметрів мікроклімату приміщень цивільної оборони. *Всеукраїнська науково-технічна конференція факультету будівництва, цивільної та екологічної інженерії* : матеріали ІІ наук.-техн. конф. підрозділів ВНТУ (м. Вінниця, 31 трав. 2022 р.). Вінниця: ВНТУ, 2022. URL: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fbtegp/all-fbtegp-2022/paper/view/14884> (дата звернення: 03.03.2026).
5. Рябова С. С., Струмінська Т. В., Антоненко І. В. Бомбосховище: особливості облаштування внутрішнього простору. *Інноватика в освіті, науці та бізнесі: виклики та можливості* : матеріали ІІІ Всеукр. конф. здобувачів вищої освіти і молодих учених (м. Київ, 2022 р.). Київ : КНУТД, 2022. С. 207–213.
6. Класифікація сховищ. URL: <https://www.mybunker.in.ua/shelterstypes>. (дата звернення: 03.03.2026).
7. Фінське бомбосховище – місто 1960-х рр. *За лаштунками*. 2022. Ст. 1.
8. Деякі питання використання захисних споруд цивільного захисту. Порядок створення, утримання фонду захисних споруд цивільного захисту, виключення таких споруд із фонду та ведення його обліку: Постанова Каб. Міністрів України від 10.03.2017р. № 138. URL:

<https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/138-2017-%D0%BF#Text> (дата звернення: 13.03.2026).

9. Хімичева Г. І., Дзюба О. О. Оцінювання укриттів та бомбосховищ за показниками безпеки та комфортності. *Наука. Інновації. Якість* : матеріали національного наук.-практ. форуму (м. Харків, 09–10 серп. 2022 р.). Харків : УПА, 2022. С. 56–59.

10. Голубка М. Архітектура війни. Старе та нове життя бункерів. *Pragmatika*. 2022. 18 жовт. URL: <https://pragmatika.media/arhitektura-vijnistare-ta-nove-zhittja-bunkeriv/> (дата звернення 14.03.2026)

11. Барбашин В. В., Росоха В. О., Скрипник О. С., Білим П. А., Захисні споруди цивільного захисту: конспект лекцій для студентів денної та заочної форм навчання першого (бакалаврського) рівня вищої освіти за спеціальністю 263 «Цивільна безпека». Харків: ХНУМГ імені О. М. Бекетова, 2021. 71 с.

12. ДСТУ ISO 14644-1:2009. Чисті приміщення та пов'язані з ними контрольовані середовища. Частина 1. Класифікація чистоти повітря (ISO 14644-1:1999, IDT). [Чинний від 2012-01-01]. Київ : Держспоживстандарт України, 2012. 24 с.

13. ВООЗ: як забруднене повітря впливає на здоров'я населення. URL: https://ecoclubrivne.org/ambient_air_pollution/ (дата звернення: 16.03.2026).

14. Passi A., Nagendra S. M. S., Maiya M. P. Characteristics of indoor air quality in underground metro stations: A critical review. *Building and Environment*. 2021. Vol. 198. 107907. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360132321003139> (дата звернення: 20.03.2026).

15. WHO Global Air Quality Guidelines – World Health Organization. URL: <https://iris.who.int/server/api/core/bitstreams/551b515e-2a32-4e1a-a58c-cdaecd395b19/content> (дата звернення: 20.03.2026).

16. Сучасні бомбосховища: мікроклімат понад усе. URL: <https://osushuvachi.ua/suchasni-bomboskhovyshcha-mikroklimat-ponad-use/> (дата звернення: 20.03.2026).

17. Антонюк В. С., Мережаний Ю. Г., Пономаренко А. І. Автоматизований моніторинг та керування мікрокліматом виробничого приміщення складання прецизійних приладів. *Різання і інструмент в технологічних системах* : міжнар. наук.-техн. зб. Харків : НТУ «ХП», 2021. №80 С. 3–14.

18. Панкевич В. В., Гуменчук А. Є., Томчук М. А. Аналіз міжнародних практик облаштування бомбосховищ та укриттів. *Молодь в науці: дослідження, проблеми, перспективи* : матеріали міжнар. наук.-практ. інтернет-конф. (м. Вінниця, 5 листоп. 2025 р.). Вінниця : ВНТУ, 2025. С. 83–86.

19. Євсєєнко О., Качанов П. Розробка системи SCADA-контролю мікроклімату приміщень торговельних центрів. *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*. 2022. Т. 309, № 3. С. 168–176.

20. Хімичева Г., Дзюба О. Вибір та обґрунтування механізмів та інструментів побудови системи контролю мікроклімату укриттів. *Науковий огляд (Scientific Review)*. 2023. Т. 3, № 88. С. 142–153.

21. Діордієв В. Т., Кашкар'єв А. О., Діордієв О. О. Автоматизована система моніторингу та керування мікрокліматом у теплиці. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету*. 2018. Вип. 8, Т. 2.

22. ДСТУ Б В.1.1-36:2016. Визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпекою. [Чинний від 2017-01-01]. Вид. офіц. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2016. 27с.

23. Про затвердження вимог щодо утримання, облаштування та експлуатації об'єктів фонду захисних споруд цивільного захисту, здійснення обліку фонду захисних споруд цивільного захисту, визначення критеріїв неможливості подальшого утримання та експлуатації захисних споруд цивільного захисту, оформлення документів, що підтверджують таку неможливість: наказ МВС України 09.07.2018 р. № 579. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0879-18#Text> (дата звернення: 20.03.2026).

24. ДБН В.2.2-5:2023. Захисні споруди цивільного захисту. [Чинний від 2024-11-13]. Київ: Мінрегіон України, 2023. 80 с.

25. Захисні споруди чи споруди подвійного призначення: принципові відмінності і не тільки. *Shieldfire* : блог. URL: <https://shieldfire.com.ua/blog/novini-ta-publikaciyi/zahysni-sporudy-chy-sporudy-podviynogo-pryznachennya-pryntsypovi-vidminnosti-i-ne-tilky/> (дата звернення: 20.03.2026).

26. Споруди подвійного призначення та найпростіші укриття. URL: <https://ts.kiev.ua/sporudy-podviynogo-pryznachennya-ta-najprostishi-ukryttya/> (дата звернення: 20.03.2026).

27. ДБН В.2.3-7:2018. Метрополітени. Споруди транспорту. [На заміну ДБН В.2.3-7-2010 ; чинний від 2018-09-01]. Київ : Мінрегіон України, 2018. 154 с.

28. Укриття потребують систем вентиляції. URL: <https://ventilation-system.com/ru/ukrittya-potrebuyut-sistem-ventilyacii/> (дата звернення: 20.03.2026).

29. Indoor Air Pollution and Health Effects in Subway Systems – Y. Wen et al. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2020. URL: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC7037944/> (дата звернення: 21.03.2026).

30. Сміт А. Л. Моделювання та оптимізація систем вентиляції для забезпечення енергоефективності. *Теплоенергетика*. 2017. № 4. С. 25–40.

31. Novorushchenko T., Aleksov S., Boyarchuk A. Decision-Making Method for the Humidity Control Subsystem of the Cyber-Physical System «Smart House». *2023 13th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies (DESSERT)*. 2023. P. 1–4.

32. Waheed W., Anwer S., Khan M. U., Sajjad M., Alazzam A. 2D Ti₃C₂Tx-MXene nanosheets and graphene oxide based highly sensitive humidity sensor for wearable and flexible electronics. *Chemical Engineering Journal*. 2024. Vol. 480. 147814.

33. Komarudin M., Septama H. D., Yulianti T. Autonomous cyber physical systems for monitoring of methane gas in rice field. *2nd International Conference on Smart and Innovative Agriculture (ICoSIA 2021)*. 2022. P. 138–143.

34. ДСанПіН 2.2.4-171-10. Гігієнічні вимоги до мікроклімату та води питної, призначеної для споживання людиною. Київ : МОЗ України, 2010. 40с.

35. Zhang X., Fan Y., Yu W., Wang H., Zhao F., Tao H., Fu Z. Investigation of Indoor Air Quality and Staff Satisfaction in Underground Buildings in Xi'an, China. *Polish Journal of Environmental Studies*. 2021. Vol. 30, No. 4. P. 3365–3373. URL: <https://www.pjoes.com/pdf-130966-65450?filename=Investigation-of-Indoor-A.pdf>

(дата звернення: 22.03.2026).

36. Кауфман Л. Л., Лисиков Б. А. Підземне сховище : в 2 т. Т. 2 : монографія. Донецк : Норд-Пресс, 2005. 216 с.

37. Амеліна К., Купнєвич Л. Чи може (і чи повинна) країна масово й швидко забезпечити укриттям кожного? Частина перша. Історія. *LB.ua*. 2023. 13 листоп. URL:

https://lb.ua/society/2023/11/13/583961_chi_mozhe_i_chi_povinna_kraina_masovo_y.html (дата звернення: 09.04.2026).

38. Михайлова Р., Антоненко І. В., Рябова С. Сучасне бомбосховище: актуальні завдання та модернізація. *Актуальні проблеми сучасного дизайну : зб. матеріалів V Міжнар. наук.-практ. конф. (м. Київ, 27 квіт. 2023 р.)*. У 2 т. Т. 2. Київ : КНУТД, 2023. С. 217–220. URL: . <https://er.knutd.edu.ua/handle/123456789/24751> (дата звернення: 15.04.2026).

39. Pang L., Yang C., Cao X., Tian Q., Li B. Experimental Investigation of Air Quality in a Subway Station with Fully Enclosed Platform Screen Doors. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2020. Vol. 17, Iss. 14. 5213. URL: <https://www.mdpi.com/1660-4601/17/14/5213> (дата звернення: 15.04.2026).

40. Купін А. І., Музика І. О., Кузнецов Д. І. Структура експертної системи інтелектуального регулювання мікроклімату житлових приміщень. *Радіоелектроніка, інформатика, управління*. 2017. № 1 (40). С. 170–177.

41. Архітектура системи контролю мікроклімату в замкненому приміщені URL:

https://www.researchgate.net/publication/369015223_ARHITEKTURA_SISTEMI_KONTROLU_MIKROKLIMATU_U_ZAMKNUTOMU_PRIMISENNI (дата звернення: 16.04.2026).

42. Karthikeyan S., Sethu K., Saran Kumar N. V. Iot based air quality index monitoring system using ESP32. *International Research Journal of Education and Technology*. 2024. Vol. 6, Iss. 4. P. 70–74. URL: https://www.irjweb.com/user_upload/Iot%20based%20air%20quality%20index%20monitoring%20system%20using%20ESP32.pdf (дата звернення: 16.04.2026).
43. Aqara tvoc aaq5-s01 даташит URL: https://cdn.aqara.com/cdn/website/mainland/static/docs/TVOC-Air-Quality-Monitor_Manual_EN.pdf (дата звернення: 16.04.2026).
44. Монітор якості повітря Xiaomi MIIW URL: https://www.joom.com/uk/products/6272626a21190b014a9b1f42?srsltid=AfmBOoqgZSw0c2rvrupydYmK0H4oKLWfsPN_APPorA0X0cF2V4jhix61&variant_id=6272626a21190b164a9b1f44 (дата звернення: 16.04.2026).
45. Bosean t-z01 datasheet URL: <https://m.media-amazon.com/images/I/B1IfUQmET-L.pdf> (дата звернення: 16.04.2026).
46. PROTMEX PTH-5 datasheet URL: <https://bhvtotaal.nl/media/productdownloads//h/a/handleiding-c02-monitor-ptn-5.pdf> (дата звернення: 16.04.2026).
47. Honeywell W7750A-C AHU Controller Manual URL: <https://www.scribd.com/document/927517507/Honeywell-w7750-Controller> (дата звернення: 16.04.2026).
48. Siemens Desigo CC URL: <https://www.siemens.com/uk-ua/products/desigo/cc/> (дата звернення: 16.04.2026).
49. Marques G., Pitarma R., Garcia N., Pombo N. Indoor Air Quality Monitoring Systems for Enhanced Living Environments: A Review toward Sustainable Development. *Sustainability*. 2020. Vol. 12, Iss. 10. 4024. URL: <https://www.mdpi.com/2071-1050/12/10/4024> (дата звернення: 16.04.2026).
50. Lopes S. I., Monteiro T., Ferreira F., Silva H. Low-Cost Sensor Systems and IoT Technologies for Indoor Air Quality Monitoring. *Sensors*. 2025. Vol. 25, Iss. 2. 7567. URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/25/24/7567> (дата звернення: 17.04.2026).

51. Building Management System. *ScienceDirect Topics*. 2024. URL: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/building-management-system> (дата звернення: 17.04.2026).
52. Building Automation System. *ScienceDirect Topics*. 2026. URL: <https://www.sciencedirect.com/topics/computer-science/building-automation-system> (дата звернення: 20.04.2026).
53. ISO 7730:2005 – Ergonomics of the Thermal Environment: Analytical Determination and Interpretation of Thermal Comfort Using Calculation of the PMV and PPD Indices and Local Thermal Comfort Criteria. Geneva, Switzerland: ISO, 2005.
54. ESP32 - esp-dev-kits Documentation. URL: <https://docs.espressif.com/projects/esp-dev-kits/en/latest/esp32/esp-dev-kits-en-master-esp32.pdf> (дата звернення: 20.04.2026).
55. Гончаренко С. І. Основи мікроконтролерів та вбудованих систем. Вінниця : ВНТУ, 2020. 197 с.
56. Датчик температури та вологості DHT22. URL: <https://itmaster.biz.ua/directory/sensors/dht22.html/> (дата звернення: 17.03.2026).
57. Датчик якості повітря mics-5524 datasheet. URL: <https://datasheet.octopart.com/MICS-5524-SGX-Sensortech-datasheet-8613787.pdf> (дата звернення: 20.04.2026).
58. Датчик вуглекислого газу URL: [https://www.winsensor.com/d/files/infrared-gas-sensor/mh-z14b-co2-manual\(ver1_1\).pdf](https://www.winsensor.com/d/files/infrared-gas-sensor/mh-z14b-co2-manual(ver1_1).pdf) (дата звернення: 20.04.2026).
59. Ліпінський І. С., Хижняк Т. А. Web-технології в електротехнічних системах регулювання параметрів мікроклімату. *Електроніка та зв'язок*. 2016. Т. 21, № 5 (94). С. 83–87.
60. Сухоруков А. І. Енергозбереження в автоматизованих системах управління : навч. посіб. Київ : Ліра-К, 2019. 204 с.
61. Воронцов В. І. Енергоефективні алгоритми для IoT. *Вісник НТУУ «КПІ»*. Серія: Інформатика, управління та обчислювальна техніка. 2023. № 4 (15). С. 56–67.

62. Артамонов Є. Б., Радченко А. В., Станко С. М. Адаптивні методи ф'юзії даних для забезпечення точності та надійності в системах автономної навігації і моніторингу. *The role of society in the development of scientific ideas : proceedings of the XXIX International Scientific and Practical Conference (Prague, July 24–26, 2023)*. Prague : International Science Group, 2023. P. 112–116.

63. ДСТУ EN 15232:2018. Енергоефективність будівель. Вплив автоматизації, моніторингу та управління будівлями. Київ : Держспоживстандарт України, 2018. 120 с.

64. Павелко О., Куликовська Н., Тіменко А. Автоматизована система моніторингу якості повітря. *Моделювання, керування та інформаційні технології*. 2023. № 9. С. 60–64. URL: <https://mcitjournal.org.ua/index.php/MCIT/article/view/390/237> (дата звернення: 20.04.2026).

65. Nagar J. D. IoT Test Design: Frameworks, Techniques, Attacks, Patterns, and Tours. *IoT System Testing*. 2022. P. 153–164.

66. Андрусенко Ю. О. Аналіз основних моделей прогнозування часових рядів. *Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних Сил*. 2020. № 3 (65). С. 91–97.

67. Мокін Б. І., Мокін В. Б. Математичні методи ідентифікації електромеханічних процесів : монографія. Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2016. 99 с.

68. Що мається на увазі під методом ковзного середнього? URL: <https://swim.kukhnia.cx.ua/ukraincyam/shho-maietsya-na-uvazi-pid-metodom-kovznogo-serednogo.html> (дата звернення: 20.04.2026).

69. Шеліхов Ю. О., Аксак Н. Г. Модель представлення стану та прогнозування параметрів мікроклімату в розподілених інформаційно-вимірювальних системах. *Вісник Національного технічного університету «ХПИ»*. 2026. № 2 (16). URL: <https://pim.khpi.edu.ua/article/view/357947/343823> (дата звернення: 20.04.2026).

70. Радкевич О. П. Адаптивне тестування в контексті використання електронних засобів навчання: суть, розроблення та оцінювання. *Професійна педагогіка*. 2023. № 1 (26). С. 58-73. <https://doi.org/10.32835/2707-3092.2023.26>.

71. Супрун О. М., Стефінко Я. Я., Сікора Я. Б. Адаптивні алгоритми машинного навчання для інтелектуальних систем прийняття рішень. *Наука і техніка сьогодні*. 2025. № 3 (44). С. 1485–1500. URL: <https://eprints.zu.edu.ua/43299/1/1.pdf> (дата звернення: 20.04.2026).

72. Міркевич Р. М., Путятіна В. А. Розробка програмного каркасу для контролерів базової системи керування процесом з урахуванням вимог до інтегрування з іншими підсистемами і реалізації сервісних функцій діагностики та обслуговування. *Проблеми виведення з експлуатації об'єктів ядерної енергетики та відновлення оточуючого середовища* : матеріали I Міжнар. конф. (м. Славутич, 2016 р.). Славутич, 2016. С. 161–165.

73. Ozkeser S. J., Johnston L., Hirschberger S., Erkalın V., Glousher C., Ösen K. Cyber-physical systems in the Industry 4.0: a review, categorization and outlook. *IFAC-PapersOnLine*. 2023. Vol. 56, Iss. 5. P. 1731–1772

74. Perform analytics at the edge. *AWS Well-Architected Framework: IoT Lens*. URL: <https://docs.aws.amazon.com/wellarchitected/latest/iot-lens/perform-analytics-at-the-edge.html> (дата звернення: 24.01.2026)

75. Artamonov Y., Golovach I., Krant D., Rosinska H., Nechyporuk O., Stanko S. Dynamic Content Generation Methods Based on User Behavioral Ranking. *2022 IEEE 4th International Conference on Advanced Trends in Information Theory (ATIT)* (Kyiv, Ukraine, Dec. 15–17, 2022). Kyiv : IEEE, 2022. P. 313–318.

76. Сидоренко М. П. Адаптивні мережі для сховищ. *Інформаційна безпека та комп'ютерні технології* : матеріали VI Міжнар. наук.-практ. конф. (м. Кропивницький, 20–21 квіт. 2023 р.). Кропивницький : ЦНТУ, 2023. С. 78–85.

77. Zhang K., Shi Y., Karnouskos S., Sütő J., Fang J. Advancements in Industrial Cyber-Physical Systems: An Overview and Perspectives. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2022. Vol. 19, Iss. 1. P. 716–729.

78. Iqbal F., Azam Z., Shukla S., Lahiri J., Jha S. Transforming a Standalone Machine to a Cyber-Physical System: A Case of a Machine to Tackle the COVID-Restrictions. *Cyber-Physical Systems*. 2022. P. 330–344.

79. Власов М. М., Козловський В. М. Хмарні та гібридні технології збереження інформації. *Системи обробки інформації*. 2022. № 1. С. 89–94.

80. Грига В., Сніжинський К. Розробка системи моніторингу мікроклімату в підземних спорудах подвійного призначення (укриттях). *Перспективні мережеві та комп'ютерні технології: зб. тез доп. 17-ї наук.-техн. конф. ПерСиК* (м. Харків, 23 квіт. 2026 р.). Харків, 2026. С.

81. Грига В., Сніжинський К. Метод та кіберфізична система моніторингу мікроклімату в підземних спорудах подвійного призначення. *Сучасні інформаційні технології та системи в управлінні: зб. тез доп. VII міжнар. наук.-практ. конф.* (м. Київ, 28-29 квіт. 2026 р.). Київ, 2026. С.

ДОДАТОК А (обов'язковий)

Копія тез доповіді у науково-практичному виданні

УДК: 628.88

РОЗРОБКА СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ МІКРОКЛІМАТУ В ПІДЗЕМНИХ СПОРУДАХ ПОДВІЙНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ (УКРИТТЯХ)

Сніжинський К.В., студент гр.КІ2м-24-1

Науковий керівник: к.т.н, доцент Грига В.М.

Хмельницький Національний Університет

Актуальність. З огляду на зростаючу загрозу військових конфліктів та природних катастроф, підземні споруди подвійного призначення, зокрема укриття, стали використовуватися як місця для тривалого перебування людей. Це підвищує потребу в постійному моніторингу мікроклімату для забезпечення комфортних і безпечних умов.

Метою роботи розробити алгоритм моніторингу температури, вологості та якості повітря. Використати адаптивні методи збору даних для оптимізації енергоспоживання. Реалізувати автоматичне керування вентиляцією та обігрівом на основі даних сенсорів.

Аналіз рішень. Існуючі системи моніторингу мікроклімату часто орієнтовані на стаціонарні умови та потребують постійного електроживлення і мережевого підключення. Більшість таких рішень не враховують необхідність адаптивної зміни частоти вимірювань і не забезпечують достатнього рівня автономності.

Результати. Розроблена система включає: збір даних через сенсори DHT22 (температура та вологість) та MICS-5524 (якість повітря); обробка даних і їх аналіз з подальшою адаптацією частоти вимірювань в залежності від стабільності мікроклімату; автоматичне управління вентиляцією та інших виконавчих механізмів для підтримки оптимальних умов.

Висновки. Запропонована система дозволяє забезпечити ефективний моніторинг мікроклімату в підземних спорудах, а автоматичне керування виконавчими механізмами забезпечує своєчасну реакцію на відхилення параметрів середовища. Використання адаптивних алгоритмів підвищує енергоефективність та надійність роботи системи.

ДОДАТОК Б (обов'язковий)

Копія тез доповіді у науково-практичному виданні

УДК: 628.88

*Сніжинський К.В., студент магістратури
Хмельницький національний університет
kostya20001592@gmail.com*

МЕТОД ТА КІБЕРФІЗИЧНА СИСТЕМА МОНІТОРИНГУ МІКРОКЛІМАТУ В ПІДЗЕМНИХ СПОРУДАХ ПОДВІЙНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

Забезпечення належних умов мікроклімату в підземних спорудах подвійного призначення має особливе значення, оскільки правильне регулювання параметрів середовища критично впливає на безпеку та комфорт людей. Від контролю температури, вологості та якості повітря залежить їхнє здоров'я та ефективність роботи. [1]

Існуючі підходи до моніторингу мікроклімату в основному обмежуються періодичними вимірюваннями, що не дозволяє отримати точні та своєчасні дані для коригування умов середовища. Для ефективного моніторингу необхідно використовувати автоматизовані системи, які можуть здійснювати безперервний збір, обробку та аналіз даних, а також надавати керуючі сигнали для стабілізації параметрів. [2]

У даній роботі розроблено метод моніторингу мікроклімату, що ґрунтується на використанні кіберфізичної системи для безперервного контролю температури, вологості та якості повітря в підземних спорудах подвійного призначення. Основним компонентом системи є мікроконтролер ESP32, який взаємодіє із сенсорами, що вимірюють необхідні параметри, а також з виконавчими пристроями для автоматичного регулювання середовища. [3]

Запропонований метод передбачає попередню обробку вимірних даних з використанням фільтрації та згладжування для зменшення впливу випадкових похибок і забезпечення точності результатів. Водночас система адаптується до змін середовища, коригуючи частоту вимірювань залежно від стабільності параметрів, що дозволяє знижувати енергоспоживання в стабільних умовах.

Система також здатна автоматично формувати керуючі впливи на вентиляцію та обігрів у разі відхилення параметрів від встановлених меж. Завдяки цьому забезпечується підтримка комфортних умов, що відповідають стандартам безпеки. [4]

Передача даних у хмарне середовище через Wi-Fi дозволяє здійснювати віддалений моніторинг та забезпечує доступ до інформації в реальному часі. Це також дозволяє зберігати історичні дані для подальшого аналізу та оптимізації роботи системи.

Отже, розроблений метод та кіберфізична система моніторингу мікроклімату забезпечують підвищення ефективності контролю параметрів середовища, знижують енергоспоживання, автоматизують керування та створюють умови для ефективного управління підземними спорудами.

Список використаних джерел

1. Панкевич О. Д. Паламарчук О. М. Забезпечення параметрів мікроклімату приміщень цивільної оборони // *Матеріали LI науково-технічної конференції підрозділів ВНТУ*, Вінниця, 31 травня 2022 р. URL: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fbtegp/all-fbtegp-2022/paper/view/14884> (дата звернення: 03.03.2026).
2. Хімичева Г.І., Дзюба О.О. Оцінювання укриттів та бомбосховищ за показниками безпеки та комфортності. Наука. Інновації. Якість: *Матеріали національного науково-практичного форуму*, Харків 09-10 серпня 2022 року за заг. ред. к.т.н., доц. Г. С. Грінченко. Українська інженерно-педагогічна академія. Харків: УІПА, 2022. – С. 56-59.
3. Хімичева Г., Дзюба О., "Вибір та обґрунтування механізмів та інструментів

побудови системи контролю мікроклімату укриттів,” *Scientific Review*, т. 3, № 88, с. 19, 2023.
 URL: [https://doi.org/10.26886/2311-4517.3\(88\)2023.2](https://doi.org/10.26886/2311-4517.3(88)2023.2) (дата звернення: 03.03.2026).


4. «Вентиляція у спорудах подвійного призначення». URL:
<https://ukrblog.vents.ua/articles/ukryttya-potrebuyut-system-ventylyatsiji.html> (дата звернення:
 05.03.2026).

Науковий керівник: Грига В.М. к.т.н, доцент




ДОДАТОК В (обов'язковий)

Презентація до захисту кваліфікаційної роботи



МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Кафедра комп'ютерної інженерії та інформаційних систем



**Метод та кіберфізична система
визначення та моніторингу
мікроклімату в підземних спорудах
подвійного призначення (укриттях)**

Здобувач: Костянтин СНІЖИНСЬКИЙ
Науковий керівник; к.т.н., доцент Володимир ГРИГА

Хмельницький - 2026

МЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою кваліфікаційної роботи є підвищення ефективності контролю параметрів мікроклімату в підземних спорудах подвійного призначення шляхом розроблення кіберфізичної системи моніторингу, здатної здійснювати збір, оброблення, аналіз і передавання даних про стан внутрішнього середовища, та забезпечувати своєчасне виявлення відхилень, а також формувати керуючі впливи на вентиляцію та обігрів.

Об'єктом дослідження є процес контролю та підтримання параметрів мікроклімату в підземних спорудах подвійного призначення.

Предметом дослідження є методи, алгоритми та технічні засоби побудови кіберфізичної системи моніторингу мікроклімату в укриттях.

ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Поставлена мета досягається розв'язанням таких основних завдань:

- проаналізувати існуючі методи та засоби контролю параметрів мікроклімату в укриттях і підземних спорудах;
- дослідити сучасні підходи до побудови кіберфізичних систем моніторингу;
- розробити структурну схему кіберфізичної системи моніторингу мікроклімату;
- розробити алгоритми збору, обробки та фільтрації даних сенсорів;
- реалізувати метод адаптивної зміни інтервалу вимірювань параметрів мікроклімату залежно від стану середовища, що забезпечує зниження енергоспоживання системи;
- реалізувати автоматичне керування вентиляцією та обігрівом залежно від стану середовища;
- провести експериментальні дослідження працездатності та ефективності запропонованої системи.

НАУКОВА НОВИЗНА ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Наукова новизна отриманих результатів:

- набув подальшого розвитку метод моніторингу мікроклімату в підземних спорудах подвійного призначення, який на відміну від відомих підходів враховує комплексний контроль температури, відносної вологості та якості повітря, враховує наявність випадкових шумів та нестабільність вимірювань, що досягається шляхом використання процедур фільтрації, а також реалізує адаптивну зміну інтервалу вимірювання залежно від стану середовища, що дозволяє підвищити точність контролю параметрів та знизити енергоспоживання системи;
- удосконалено метод формування керуючих впливів у кіберфізичній системі моніторингу мікроклімату, який, на відміну від існуючих рішень, забезпечує автоматичне керування вентиляцією та обігрівом на основі аналізу параметрів середовища, що дозволяє підвищити оперативність реагування та стабільність підтримання допустимих умов мікроклімату.

ПРАКТИЧНА ЦІННІСТЬ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

- Практична цінність отриманих результатів полягає в тому, що в результаті виконаного дослідження розроблено метод адаптивного моніторингу мікроклімату з використанням змінного інтервалу вимірювань та фільтрації даних, а також апаратно-програмну реалізацію кіберфізичної системи моніторингу мікроклімату, яка може бути використана для безперервного контролю параметрів повітряного середовища в укриттях. Розроблена система забезпечує своєчасне виявлення небезпечних відхилень, можливість дистанційного моніторингу та автоматичне формування керуючих дій для підтримання допустимих умов перебування людей.

АКТУАЛЬНІСТЬ ДОСЛІДЖЕННЯ

- З огляду на зростаючу загрозу військових конфліктів та природних катастроф, підземні споруди подвійного призначення, зокрема укриття, стали використовуватися як місця для тривалого перебування людей. Це підвищує потребу в постійному моніторингу мікроклімату для забезпечення комфортних і безпечних умов.
- Кіберфізичні системи моніторингу є новітнім підходом до вирішення цієї проблеми, оскільки можуть забезпечити не тільки сенсорне вимірювання, обробку даних але й адаптивне реагування на зміни в реальному часі.
- Ключова ціль полягає в розробці методу адаптивного моніторингу мікроклімату з використанням змінного інтервалу вимірювань, та кіберфізичної системи моніторингу мікроклімату в підземних спорудах подвійного призначення з функціями автоматизованого контролю, передачі даних та керування виконавчими механізмами.

АНАЛІЗ ВІДОМИХ МЕТОДІВ

- Однією з тенденцій розвитку систем моніторингу є використання кіберфізичних підходів. У таких системах фізичні сенсорні дані інтегруються з цифровими алгоритмами аналізу та прогнозування. Це дозволяє не лише фіксувати поточний стан мікроклімату, а й оцінювати ризики його погіршення в майбутньому. Застосування алгоритмів машинного навчання відкриває можливості адаптивного налаштування параметрів вентиляції залежно від реальних умов експлуатації.
- IoT-системи дозволяють поєднати сенсорні вимірювання, обробку даних та передачу інформації у реальному часі з можливістю подальшого аналізу. На відміну від автономних та локальних систем, вони забезпечують гнучкість.
- Саме це визначає напрям удосконалення існуючих підходів та обґрунтовує вибір IoT-технологій як основи для розробки запропонованої кіберфізичної системи.

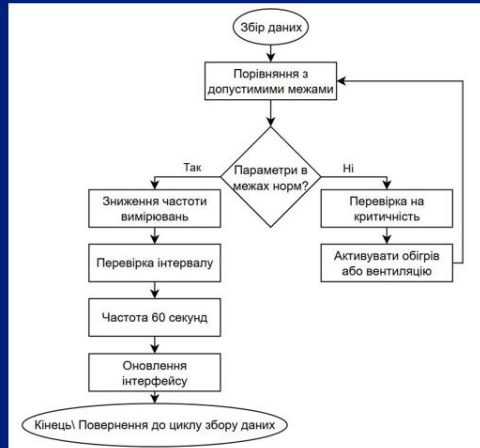
МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ ТА МОНІТОРИНГУ МІКРОКЛІМАТУ В ПІДЗЕМНИХ СПОРУДАХ

Збір, обробка та оцінювання даних



МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ ТА МОНІТОРИНГУ МІКРОКЛІМАТУ В ПІДЗЕМНИХ СПОРУДАХ

Блок-схема оцінки та коригування параметрів мікроклімату



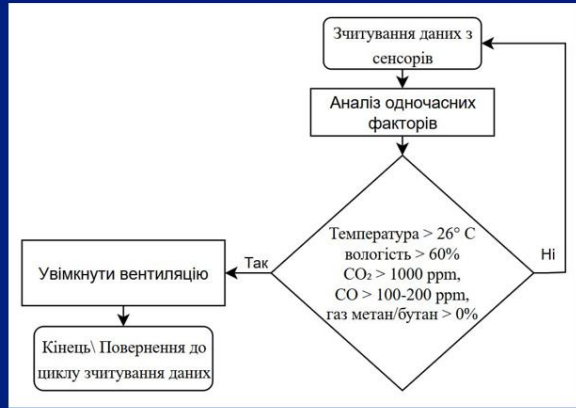
МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ ТА МОНІТОРИНГУ МІКРОКЛІМАТУ В ПІДЗЕМНИХ СПОРУДАХ

Блок-схема прийняття рішень при зміні температури



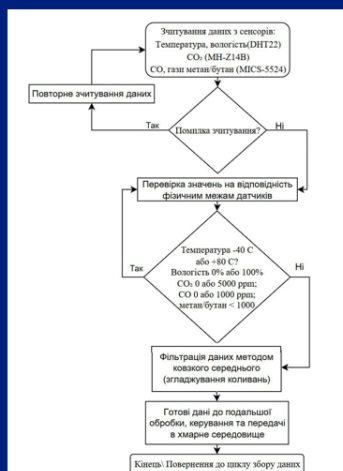
МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ ТА МОНІТОРИНГУ МІКРОКЛІМАТУ В ПІДЗЕМНИХ СПОРУДАХ

Блок-схема логіка сценаріїв

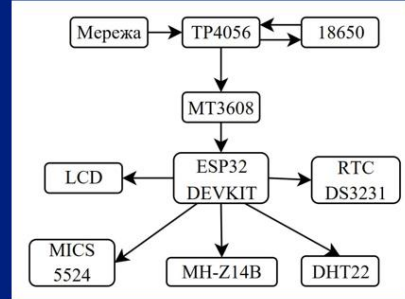
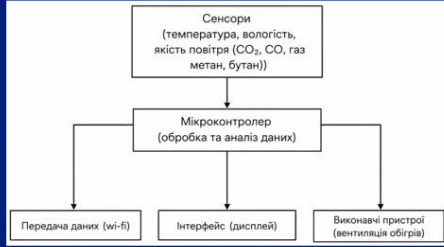


МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ ТА МОНІТОРИНГУ МІКРОКЛІМАТУ В ПІДЗЕМНИХ СПОРУДАХ

Блок-схема фільтрації та підвищення достовірності вимірювань

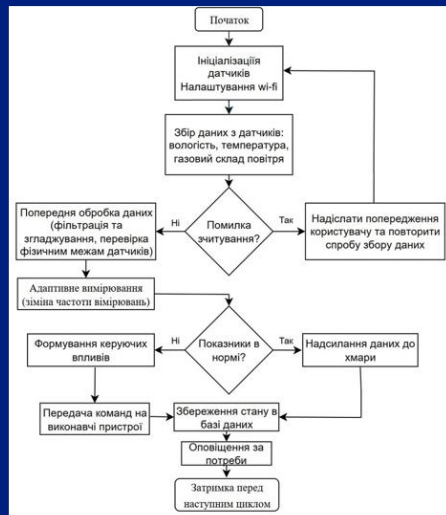


Модель та структурна схема системи моніторингу мікроклімату



РЕАЛІЗАЦІЯ КІБЕРФІЗИЧНОЇ СИСТЕМИ

Блок-схема алгоритму функціонування кіберфізичної системи



ЕКСПЕРИМЕНТИ

Порівняння режимів функціонування системи та витрат енергії в різних режимах роботи



Параметр	Стандартний режим	Адаптивний режим
Інтервал вимірювань	30 с	60 с
Частота опитування сенсорів	постійна	змінна
Кількість вимірювань за добу	2880	1440
Добове енергоспоживання	вище	нижче на 15–20 %
Ефективність реагування	середня	висока

ВИСНОВКИ

У роботі за результатами виконаних теоретичних та практичних досліджень:

- проаналізовано існуючі методи та засоби контролю параметрів мікроклімату в укриттях і підземних спорудах;
- досліджено сучасні підходи до побудови кіберфізичних систем моніторингу;
- розроблено структурну схему кіберфізичної системи моніторингу мікроклімату;
- поєднано алгоритми збору, обробки та фільтрації даних сенсорів;
- реалізовано метод адаптивного опитування датчиків для зменшення енергоспоживання;
- реалізовано автоматичне керування вентиляцією та обігрівом залежно від стану середовища;
- проведено експериментальні дослідження працездатності та ефективності запропонованої системи.

Запропонований метод адаптивного моніторингу забезпечив оптимізацію продуктивності кіберфізичної системи моніторингу мікроклімату в підземних спорудах подвійного призначення, що дозволило знизити енергоспоживання на 15–20% завдяки використанню адаптивного інтервалу вимірювань.



ПУБЛІКАЦІЇ

- Грига В., Сніжинський К. Розробка системи моніторингу мікроклімату в підземних спорудах подвійного призначення (укриттях). Перспективні мережеві та комп'ютерні технології: зб. тез доп. 17-ї наук.-техн. конф. ПерСНК (м. Харків, 23 квіт. 2026 р.). Харків, 2026.
- Грига В., Сніжинський К. Метод та кіберфізична система моніторингу мікроклімату в підземних спорудах подвійного призначення. Сучасні інформаційні технології та системи в управлінні: зб.тез доп. VII міжнар.наук.-практ. конф. (м. Київ, 28-29 квіт. 2026 р.). Київ, 2026.

ДОДАТОК Г

Лістинг програмного забезпечення моніторингу мікроклімату

```
#include <WiFi.h>
#include <DHT.h>
#include <MICS5524.h>
#include <MHZ19.h> // Бібліотека для MH-Z19B

// Пін для сенсорів
#define DHTPIN 4
#define DHTTYPE DHT22
DHT dht(DHTPIN, DHTTYPE);
MICS5524 airQualitySensor; // Для CO, метану, бутану
MHZ19 co2Sensor; // Об'єкт для MH-Z19B (CO2)

// Налаштування Wi-Fi
const char* ssid = "YourSSID";
const char* password = "YourPassword";

// Змінні для фільтрації
float lastTemperature = 0.0;
float lastHumidity = 0.0;
float lastAirQuality = 0.0;
float lastMethane = 0.0;
float lastButane = 0.0;
float lastCo2 = 0.0; // Змінна для зберігання попереднього
значення CO2
int stableReadingsCount = 0; // Лічильник стабільних
вимірювань
unsigned long lastMeasurementTime = 0;
unsigned long measurementInterval = 30000; // Стандартний
інтервал (30 секунд)

// Функція для усереднення даних (ковзне середнє)
```

```

float movingAverage(float currentReading, float
previousReading, int windowSize) {
    return (previousReading * (windowSize - 1) + currentReading)
/ windowSize;
}

void setup() {
    Serial.begin(115200); // Ініціалізація серійного порту для
монітору
    dht.begin(); // Ініціалізація датчика DHT22 для
температури та вологості
    airQualitySensor.begin(); // Ініціалізація сенсора MICS-5524
    co2Sensor.begin(); // Ініціалізація сенсора MH-Z19B для
вимірювання CO2

    // Підключення до Wi-Fi
    WiFi.begin(ssid, password);
    while (WiFi.status() != WL_CONNECTED) {
        delay(1000);
        Serial.println("Підключення до Wi-Fi...");
    }
    Serial.println("Wi-Fi підключено");
}

void loop() {
    unsigned long currentMillis = millis();

    // Перевірка інтервалу вимірювання
    if (currentMillis - lastMeasurementTime >=
measurementInterval) {
        lastMeasurementTime = currentMillis;

        // Зчитування даних з сенсорів
        float temperature = dht.readTemperature(); // Температура
        float humidity = dht.readHumidity(); // Вологість

```

```
float airQuality = airQualitySensor.readCO(); // Якість
повітря (CO)
int co2 = co2Sensor.getCO2(); // Концентрація
CO2 (ppm)
float methane = airQualitySensor.readMethane(); // Метан
float butane = airQualitySensor.readButane(); // Бутан

// Перевірка на коректність даних
if (isnan(temperature) || isnan(humidity) || isnan(co2) ||
isnan(methane) || isnan(butane)) {
    Serial.println("Помилка при зчитуванні даних з
датчика!");
    return;
}

// Застосування фільтрації (середнє значення для
температури та вологості)
temperature = movingAverage(temperature, lastTemperature,
5); // 5 - розмір вікна
humidity = movingAverage(humidity, lastHumidity, 5);
airQuality = movingAverage(airQuality, lastAirQuality, 5);
methane = movingAverage(methane, lastMethane, 5);
butane = movingAverage(butane, lastButane, 5);

// Оновлення останніх значень
lastTemperature = temperature;
lastHumidity = humidity;
lastAirQuality = airQuality;
lastMethane = methane;
lastButane = butane;
lastCo2 = co2;

// Виведення результатів
Serial.print("Температура: ");
Serial.print(temperature);
```

```
Serial.print(" °C, Вологість: ");
Serial.print(humidity);
Serial.print(" %, CO2: ");
Serial.print(co2);
Serial.print(" ppm, Метан: ");
Serial.print(methane);
Serial.print(" ppm, Бутан: ");
Serial.println(butane);

// Перевірка значень на відповідність фізичним мегам
if (temperature < -40 || temperature > 80) {
    Serial.println("Температура за межами допустимого
діапазону!");
}

if (humidity < 0 || humidity > 100) {
    Serial.println("Вологість за межами допустимого
діапазону!");
}

if (co2 < 0 || co2 > 5000) {
    Serial.println("Концентрація CO2 за межами допустимого
діапазону!");
}

if (methane < 0 || methane > 1000) {
    Serial.println("Концентрація метану за межами допустимого
діапазону!");
}

if (butane < 0 || butane > 1000) {
    Serial.println("Концентрація бутану за межами допустимого
діапазону!");
}
```

```

// Перевірка зміни значень
  if (abs(temperature - lastTemperature) > 1 ||
      abs(humidity - lastHumidity) > 1.0 ||
      abs(co2 - lastCo2) > 50 ||      // Перевірка для CO2
      abs(methane - lastMethane) > 1.0 ||
      abs(butane - lastButane) > 1.0) {

    stableReadingsCount = 0;
    measurementInterval = 30000; // 30 секунд

  } else {
    stableReadingsCount++;
  }

  // Перехід в адаптивний режим після 3 стабільних вимірювань
  if (stableReadingsCount >= 3) {
    measurementInterval = 60000; // 60 секунд
  }

  // Порівняння з допустимими значеннями для CO2:
  if (co2 > 1000) {
    Serial.println("Концентрація CO2 висока, активуємо
вентиляцію...");
    // Код для активації вентиляції
  }

  // Перевірка з допустимими значеннями для вологості:
  if (humidity < 40) {
    Serial.println("Вологість занадто низька, активуємо
обігрівач...");
    // Код для активації обігрівача
  } else if (humidity > 60) {
    Serial.println("Вологість занадто висока, активуємо
вентиляцію...");
  }

```

```
// Код для активації вентиляції
}

// Перевірка з допустимими значеннями для температури:
if (temperature < 10) {
    Serial.println("Температура занадто низька, вмикаємо
обігрівач...");
    // Код для включення обігрівача
} else if (temperature > 26) {
    Serial.println("Температура занадто висока, вмикаємо
вентиляцію...");
    // Код для включення вентиляції
}

// Перевірка з допустимими значеннями для CO:
if (co2 > 1000) { // Якщо концентрація CO більше ніж 200 ppm
    Serial.println("Концентрація CO висока, активуємо
вентиляцію...");
    // Код для активації вентиляції
}

// Перевірка з допустимими значеннями для метану:
if (methane > 1000) { // Якщо концентрація метану більше ніж
1000 ppm
    Serial.println("Концентрація метану висока, активуємо
вентиляцію...");
    // Код для активації вентиляції
}

// Перевірка з допустимими значеннями для бутану:
if (butane > 1000) { // Якщо концентрація бутану більше ніж
1000 ppm
    Serial.println("Концентрація бутану висока, активуємо
вентиляцію...");
    // Код для активації вентиляції
```

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

РЕЦЕНЗІЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ МАГІСТРА

Здобувач: Костянтин СНІЖИНСЬКИЙ

Тема: Метод та кіберфізична система визначення та моніторингу мікроклімату в підземних спорудах подвійного призначення (укриттях)

Спеціальність: 123 «Комп'ютерна інженерія»

Обсяг кваліфікаційної роботи магістра:

Кількість листів креслень —; кількість сторінок записки 81

1. Короткий зміст роботи та прийнятих рішень У роботі розглянуто розробку кіберфізичної системи моніторингу мікроклімату в підземних спорудах подвійного призначення (укриттях) здатної здійснювати збір, оброблення, аналіз і передавання даних про стан внутрішнього середовища, та забезпечувати своєчасне виявлення відхилень, а також формувати керуючі впливи на вентиляцію та обігрів.

2. Висновок про відповідність роботи дипломному завданню Кваліфікаційна робота магістра відповідає виданому завданню

3. Характеристика виконання кожного розділу, ступінь використання останніх досягнень науки і техніки і передових методів роботи: У першому розділі проведено аналіз особливостей мікроклімату підземних споруд подвійного призначення, розглянуто нормативні вимоги. Досліджено відомі рішення та засоби в цій сфері. У другому розділі запропоновано модель кіберфізичної системи моніторингу. У третьому розділі запропоновано метод збору, обробки та аналізу даних сенсорів, реалізовано алгоритми фільтрації вимірювань, адаптивної зміни інтервалу опитування датчиків та логіку автоматичного формування керуючих впливів. У четвертому розділі виконано програмно-технічну реалізацію розробленої системи.

4. Позитивні сторони роботи: Запропонована система забезпечує своєчасне виявлення небезпечних відхилень, можливість адаптивного моніторингу

мікроклімату з використанням змінного інтервалу вимірювань та автоматичне формування керуючих впливів.

5. Негативні сторони роботи: Хоча запропонована система ефективно моніторить параметри мікроклімату, її точність може бути обмежена впливом зовнішніх факторів, таких як електромагнітні завади або короточасні поломки сенсорів, що може призвести до тимчасових неточностей у вимірюваннях. _____

6. Оцінка графічного оформлення та пояснювальної записки роботи: —

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

8. Інші зауваження: —

9. Оцінка кваліфікаційної роботи магістра:

Розглянувши позитивні та негативні сторони представленої кваліфікаційної роботи магістра вважаю, що робота заслуговує оцінки «задовільно» 70 (D)

Рецензент (прізвище, ім'я, по батькові, посада, місце роботи) _____

Борисом Леонідовичем Пешуровим, завкаф і ПЗ, ІСР

“ 15 травня ” _____ 2026р.



Зав. кафедри КПС
д-р. філософії Ользі ПАВЛОВІЙ

Костянтин СМІЖИНСЬКИЙ

ПІБ здобувача вищої освіти

ФІТ, 2 курсу, групи КІ2М-24-1

ЗАЯВА

З правилами чинного Положення про систему забезпечення академічної доброчесності у Хмельницькому національному університеті, згідно з яким виявлення академічного плагіату є підставою для відмови в допуску кваліфікаційної роботи до захисту і застосування заходів академічної відповідальності, ознайомлений (а). Про використання спеціалізованих програмних засобів (СПЗ) StrikePlagiarism та Anti-Plagiarism для перевірки кваліфікаційних робіт здобувачів вищої освіти на наявність академічного плагіату оповіщений (а). Надаю університету право на передачу моєї роботи для обробки та збереження в базах даних СПЗ і використання роботи для виявлення академічного плагіату в інших роботах, які перевіряються СПЗ.

Також надаю свою згоду на обробку й збереження університетом моєї роботи в Інституційному репозитарії Хмельницького національного університету.

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

14 травня 2026 року



Anti-Plagiarism (<http://ap.km.ua>) v-15.701

Максимальне співпадіння з одним документом 1.0%

Словники перевірки: en_US, ru_RU, ua_UA. Помилки в документах: 6%

ID: 271490 Назва: МКР Метод та кіберфізична система визначення та моніторингу мікроклімату в підземних спорудах подвійного призначення (укриттях) Додано в БД: 2026-05-14 Автора: Костянтин СНІЖИНСЬКИЙ Керівники: Володимир ГРИГА Консультанти: Опоненти:	Документ		Сумарний збіг по Базі Даних	
	Символи	Лексеми	Символи	Лексеми
	137681	988	4078 (3%)	57 (6%)

Джерело плагіату

ID	Опис	Наявність плагіату в документі	
		Символи	Лексеми

Протокол аналізу звіту подібності експертом

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

Автор: Костянтин СНИЖИНСЬКИЙ

Співавтор:

Назва: Метод та кіберфізична система визначення та моніторингу мікроклімату в підземних спорудах подвійного призначення (укриттях)

Експерт: Володимир ГРИГА

Підрозділ: Кафедра комп'ютерної інженерії та інформаційних систем

Коефіцієнт подібності 1: 8.32%

Коефіцієнт подібності 2: 3.22%

Мікропробіли: 3

Заміна букв: 15

Інтервали: 0

Білі знаки: 6

Дата створення звіту: 2026-05-14 12:53:28.0

Після аналізу Звіту подібності констатую наступне:

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


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

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

Обґрунтування:

2026-05-14

Дата

 Доцент Андрій Нічепорук

експерт

РІШЕННЯ ЕКСПЕРТНОЇ КОМІСІЇ

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

Назва кваліфікаційної роботи Метод та кіберфізична система визначення та моніторингу мікроклімату в підземних спорудах подвійного призначення (укриттях)

Автор Костянтин СНИЖИНСЬКИЙ

Освітня програма Комп'ютерна інженерія та програмування

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Спеціальність 123 Комп'ютерна інженерія

Науковий керівник: к.т.н., доцент Володимир ГРИГА

На основі аналізу кваліфікаційної роботи на дотримання вимог академічної доброчесності (у т.ч. відсутності ознак академічного плагіату) з урахуванням результатів перевірки роботи спеціалізованим програмним засобом(ами) комісія зробила такий висновок:

№	Висновок	Позначка про відповідність
1	Ознаки академічного плагіату	
1.1	Запозичення, виявлені в роботі, є законними і не є академічним плагіатом (далі – зазначаються підстави віднесення запозичень до правомірних, якщо потрібно). Робота приймається до захисту.	відповідає
1.2	Виявлені запозичення не є академічним плагіатом, розміщені в розділах, які не описують безпосередньо авторське дослідження, але кількість цитат перевищує обсяг, виправданий поставленою метою роботи (далі – зазначаються детальні та аргументовані підстави віднесення запозичень до правомірних). Робота приймається до захисту, але має бути відкоригована.	
1.3	Виявлені запозичення не є академічним плагіатом, але частково розміщені в розділах, які описують безпосередньо авторське дослідження, а кількість цитат перевищує обсяг, виправданий поставленою метою роботи. Робота може бути допущена до захисту після того як буде відкоригована та доопрацьована і успішно пройде повторну перевірку на академічний плагіат.	
1.4	Робота містить навмисні текстові спотворення, передбачувані спроби укриття текстових запозичень або інші прояви академічного плагіату. Робота містить фабрикацію або фальсифікацію даних. Робота не допускається до захисту.	
2	Інші види порушень академічної доброчесності	

Підтвердження:

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

- 1) запозичення розміщені в розділі аналізу та огляду існуючих систем моніторингу мікроклімату;
- 2) усі запозичення фрагментарні, або мають належним чином оформленні посилання;
- 3) окремі виявлені збіги є загальноживаними фразами або виразами, про що свідчить посилання системи на збіг з 7-11 джерелами на один фрагмент речення;
- 4) всі зафіксовані системою ознаки модифікації тексту відносяться до комбінування латинських символів зі україномовними скороченнями індексів в формулах, та назви бібліотек і функції, які є незмінною складовою коду, що не є модифікацією тексту.

5) значна частина знайденого плагіату відноситься до списку використаних джерел. Сумарний обсяг всіх запозичень, визначений системою виявлення збігів/ ідентичності/схожості StrikePlagiarism, складає 8,32% і адресується до 14 першоджерела; та системою Anti-Plagiarism складає 1%, що, з урахуванням наведених обґрунтувань, відповідає характеру наукового дослідження і свідчить на користь кваліфікаційної роботи.

14.05.2026

Завідувач кафедри

Гарант освітньої програми

Керівник кваліфікаційної роботи


Підпис

Ольга ПАВЛОВА
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Олег САВЕНКО
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Володимир ГРИГА
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ