

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
Факультет інформаційних технологій
Кафедра інформаційно-телекомунікаційних технологій та систем

Романюк Андрій Миколайович

(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК 681.2
(індекс)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Розробка автоматизованої системи моніторингу мікроклімату в захисних спорудах цивільного захисту

(назва роботи)

Комп'ютеризовані системи управління та автоматика

(назва освітньої програми)

174- Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка

(шифр і назва спеціальності)

Робота містить результати власних досліджень, використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело:

Здобувач освітнього ступеня _____ А. М. Романюк
(підпис, ініціали та прізвище здобувача)

Науковий керівник _____ Воропаєва Анна Олександрівна, доц., к.т.н.
(підпис, прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання керівника)

Допущено до захисту
Завідувач кафедри

_____ *Заміховський Л.М.*
(посада) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

АНОТАЦІЯ

Магістерська робота присвячена розробці автоматизованої системи моніторингу мікрокліматичних параметрів у захисних спорудах цивільного захисту на основі мікроконтролера ESP32. Запропоновано апаратно-програмне рішення для вимірювання та візуалізації температури, відносної вологості, концентрації CO₂, летких органічних сполук, індексу якості повітря, освітленості та рівня шуму в режимі реального часу.

Наукова новизна полягає у поєднанні локальної та віддаленої візуалізації мікрокліматичних параметрів у межах єдиної модульної системи. Практична значущість роботи визначається можливістю використання розробленої системи для модернізації існуючих укриттів і підвищення ефективності функціонування систем цивільного захисту.

РЕФЕРАТ

Розрахунково-пояснювальна записка: 77 сторінок, 26 рисунків, 10 таблиць, 22 посилання, 1 додаток.

Мета роботи – розробка та обґрунтування автоматизованої системи моніторингу і регулювання мікрокліматичних параметрів у захисних спорудах цивільного захисту.

Методи дослідження – системний аналіз, моделювання, експериментальні методи збору та обробки даних, методи порівняння та стандартизації, експертні оцінки.

Магістерська робота присвячена дослідженню та розробці автоматизованої системи моніторингу мікрокліматичних параметрів у захисних спорудах цивільного захисту. Актуальність теми зумовлена зростанням ролі укриттів у забезпеченні безпеки населення в умовах воєнних дій. Виконано аналіз нормативних вимог до параметрів мікроклімату, сучасного стану технічного оснащення споруд та світового досвіду застосування розумних систем контролю якості повітря. Обґрунтовано необхідність безперервного контролю температури, вологості, газового складу, шуму та освітленості для запобігання небезпечним умовам перебування людей. Розроблено апаратно-програмну архітектуру системи на базі мікроконтролера ESP32 з мультисенсорним підходом, що забезпечує збір, обробку та візуалізацію даних у режимі реального часу. Практична значущість полягає у можливості використання системи для модернізації існуючих укриттів, проектування нових споруд та підвищення ефективності цивільного захисту населення.

Ключові слова: ЗАХИСНА СПОРУДА, МІКРОКЛІМАТ, МІКРОКОНТРОЛЕР, СЕНСОР, АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА.

ABSTRACT

Explanatory Note: 77 pages, 26 figures, 10 tables, 22 references, 1 appendix.

Purpose of the work – development and substantiation of an automated system for monitoring and regulating microclimatic parameters in civil protection shelters.

Research methods – system analysis, modeling, experimental methods of data collection and processing, methods of comparison and standardization, expert evaluations.

The master's thesis is devoted to the study and development of an automated system for monitoring microclimatic parameters in civil protection shelters. The relevance of the topic is determined by the growing role of shelters in ensuring the safety of the population under conditions of military actions. The thesis includes an analysis of regulatory requirements for microclimate parameters, the current state of technical equipment of shelters, and international experience in applying smart systems for air quality control. The necessity of continuous monitoring of temperature, humidity, gas composition, noise, and illumination is substantiated to prevent hazardous conditions for people. A hardware–software architecture of the monitoring system has been developed based on the ESP32 microcontroller with a multisensor approach, providing data collection, processing, and visualization in real time. The practical significance lies in the possibility of using the system for modernization of existing shelters, design of new protective structures, and improvement of the efficiency of civil protection systems.

Keywords: SHELTER, MICROCLIMATE, MICROCONTROLLER, SENSOR, AUTOMATED SYSTEM.

ЗМІСТ

	ст.
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І СКОРОЧЕНЬ.....	7
ВСТУП.....	8
1 ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА СИСТЕМИ.....	10
1.1 Постановка проблеми дослідження у загальному вигляді.....	10
1.2 Аналіз публікацій та патентів.....	12
1.3 Принципи нормування та забезпечення умов перебування у захисних спорудах цивільного захисту.....	20
1.4 Огляд аналогів.....	27
2 РОЗРОБКА АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ.....	35
2.1 Вимоги до апаратної частини та загальні принципи функціонування системи.....	35
2.2 Архітектура апаратно-програмної системи моніторингу мікроклімату.....	38
2.3 Датчики та модулі.....	40
2.4 Середовище програмування Arduino IDE.....	48
2.5 Серверна частина на ESP32.....	50
3 РЕАЛІЗАЦІЯ СИСТЕМИ.....	53
3.1 Загальний опис.....	53
3.2 Вебінтерфейс системи.....	54
3.4. Експериментальні дослідження та тестування системи.....	64
ВИСНОВКИ.....	69
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	71
ДОДАТОК А.....	74
БІБЛІОГРАФІЧНА ДОВІДКА.....	77

КРМ.АКСМ-20.00.00.000 ПЗ

Змн.	Арк.	№ докum.	Підпис	Дата		Літ.	Арк.	Аркцшів
		<i>Романюк</i>			<i>Розробка автоматизованої системи моніторингу мікроклімату в захисних спорудах цивільного захисту.</i>			
		<i>Воропаєва</i>					6	72
						<i>ІФНТУНГ АКСМ-24-1</i>		
		<i>Возний</i>						
		<i>Заміховський</i>						

ВСТУП

Сучасні умови розвитку суспільства характеризуються зростанням кількості надзвичайних ситуацій природного, техногенного та воєнного характеру, що істотно підвищує вимоги до систем цивільного захисту населення. В умовах повномасштабних бойових дій на території України захисні споруди цивільного захисту набули особливого значення як об'єкти критичної інфраструктури, призначені для збереження життя і здоров'я цивільного населення. Ефективність функціонування таких споруд визначається не лише рівнем їхньої захисної здатності, але й умовами перебування людей усередині, зокрема параметрами мікроклімату, які безпосередньо впливають на фізичний і психофізіологічний стан людини.

Актуальність теми зумовлена необхідністю забезпечення нормативних мікрокліматичних умов у захисних спорудах цивільного захисту в умовах тривалого перебування людей.

Мета роботи – розробка та обґрунтування автоматизованої системи моніторингу мікрокліматичних параметрів у захисних спорудах цивільного захисту з використанням сучасних мікроконтролерних та сенсорних технологій.

Об'єктом дослідження є процес забезпечення нормативних мікрокліматичних умов у захисних спорудах цивільного захисту.

Предметом дослідження є методи та засоби автоматизованого моніторингу параметрів мікроклімату (температури, вологості, якості повітря, шуму та освітленості) в укриттях цивільного захисту.

Методи дослідження – системний аналіз, моделювання, експериментальні методи збору та обробки даних, методи порівняння та стандартизації та експертних оцінок.

Для досягнення поставленої мети були визначені наступні завдання:

1. Аналіз нормативних вимог до мікроклімату в захисних спорудах цивільного захисту.

					КРМ.АКСМ-20.00.000 ПЗ	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докцм.	Підпис	Дата		

2. Дослідження світового досвіду і сучасних технологій моніторингу мікроклімату.

3. Розробка структурної та функціональної схеми автоматизованої системи моніторингу.

4. Обґрунтування вибору апаратних компонентів і сенсорів системи.

5. Реалізація апаратно-програмної архітектури системи з локальною та віддаленою візуалізацією даних.

Практичне значення роботи полягає в можливості використання результатів при проєктуванні нових укриттів, модернізації існуючих захисних споруд та впровадженні сучасних систем цивільного захисту в умовах надзвичайних ситуацій і воєнних дій.

Структура магістерської роботи охоплює 3 розділи, кількість рисунків – 26, 10 таблиць, 22 джерела, 1 додаток, загальний обсяг – 77 сторінок.

					<i>КРМ.АКСМ-20.00.000 ПЗ</i>	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докцм.	Підпис	Дата		

1 ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА СИСТЕМИ

1.1 Постановка проблеми дослідження у загальному вигляді

В умовах сучасної безпекової кризи, спричиненої повномасштабною збройною агресією російської федерації проти України, проблема безпеки цивільного населення набула особливої актуальності. Захисні споруди цивільного захисту стали критично важливими інфраструктурними об'єктами для збереження життя населення в умовах ракетних ударів, артилерійських обстрілів та інших видів збройного впливу.

Однак значна частина таких споруд була спроектована кілька десятиліть тому, що зумовлює їхню невідповідність сучасним вимогам, зокрема відсутність автоматизованих систем моніторингу та керування мікрокліматичними параметрами. Однією з найбільш актуальних проблем є створення та підтримання оптимального мікроклімату в укриттях, включаючи регулювання температурного режиму, відносної вологості, повітрообміну та загальної якості повітря.

Відсутність систематичного контролю мікрокліматичних параметрів у захисних спорудах істотно підвищує ризик виникнення небезпечних умов для перебування людей. Підвищена концентрація вуглекислого газу, летких органічних сполук, надмірна вологість або недостатній повітрообмін можуть призводити до зниження когнітивних функцій, швидкої втомлюваності, загострення хронічних захворювань та виникнення гострих фізіологічних реакцій. У зв'язку з цим впровадження систем безперервного моніторингу та оцінювання стану мікроклімату в укриттях є необхідною умовою забезпечення безпечних, комфортних і санітарно прийнятних умов перебування цивільного населення в умовах тривалих надзвичайних ситуацій.

Недостатній рівень технологічного оснащення, зокрема відсутність систем автоматизованого контролю за вказаними параметрами, може призвести до погіршення умов перебування, підвищення фізіологічного та психологічного

					<i>КРМ.АКСМ-20.00.000 ПЗ</i>	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докцм.	Підпис	Дата		

дискомфорту, а також потенційної загрози для здоров'я осіб, які перебувають в укриттях упродовж тривалого часу.

Захисні споруди цивільного захисту (далі – захисні споруди) та споруди подвійного призначення (далі – СПП) проєктуються та будуються таким чином, щоб протягом певного часу (до 48 годин) створити належні умови для перебування людей, що підлягають укриттю, та забезпечити відповідний ступінь їх захисту від прогнозованих впливів небезпечних чинників, які можуть виникнути як складова частина небезпечних явищ надзвичайної ситуації, воєнних (бойових) дій та терористичних актів [1].

Для забезпечення ефективного контролю параметрів мікроклімату в захисних спорудах цивільного захисту необхідно впроваджувати сучасні автоматизовані системи моніторингу. Основними напрямками вирішення цієї задачі є:

1. Розробка програмно-апаратного комплексу для збору та обробки мікрокліматичних даних.
2. Інтеграція датчиків температури, вологості, CO₂ та інших параметрів повітряного середовища.
3. Забезпечення можливості локального або віддаленого доступу до інформації.
4. Модернізація наявних споруд із врахуванням технологічних рішень.
5. Використання методів аналітики для оцінки та прогнозування змін умов середовища.

Таким чином, розробка автоматизованої системи моніторингу мікроклімату є актуальним завданням, реалізація якого дозволить своєчасно виявляти відхилення параметрів середовища, забезпечувати комфорт та безпеку перебування людей в укриттях, а також підвищити загальну ефективність цивільного захисту в умовах бойових дій.

					<i>КРМ.АКСМ-20.00.000 ПЗ</i>	Арк.
						11
Змн.	Арк.	№ докцм.	Підпис	Дата		

1.2 Аналіз публікацій та патентів

Контроль мікроклімату за допомогою моніторингових систем передбачає інтеграцію мікроконтролерів та датчиків, їх управління параметрами навколишнього середовища, такими як температура, вологість та тиск у режимі реального часу. Такий підхід підвищує експлуатаційну ефективність та безпеку в різних сферах застосування, включаючи промислові процеси, цивільну безпеку та управління мікромережами.

Країни Швейцарія, Ізраїль мають розвинену систему укриттів. Швейцарія виділяється зобов'язанням створювати сховища в кожному будинку. Це забезпечує високу готовність до надзвичайних ситуацій, але вимагає значних фінансових ресурсів. Ізраїль робить акцент на мобільності й інтеграції безпечних зон у житлові будинки, що скорочує час доступу до укриття під час небезпеки. США оснащують спеціалізовані притулки в громадських установах, але їхня кількість є обмеженою. Південна Корея використовує багатофункціональні підземні простори (паркінги, метро) як укриття, що оптимізує інфраструктуру.

Основними елементами міжнародних стандартів у систему цивільного захисту є:

- системи вентиляції та очищення повітря (фільтри HEPA для очищення від мікрочастинок; установки для знезараження повітря від біологічних та хімічних загроз);
- контроль температури і вологості (використання автоматизованих систем моніторингу та регулювання; збереження теплового балансу за допомогою теплоізоляційних матеріалів).
- автономне енергозабезпечення (використання генераторів на основі відновлюваних джерел енергії; забезпечення аварійного освітлення із застосуванням LED-технологій);
- комфорт для перебування (ергономічне планування внутрішніх приміщень; наявність окремих зон для сну, харчування, медичної допомоги.

					<i>КРМ.АКСМ-20.00.000 ПЗ</i>	Арк.
						12
Змн.	Арк.	№ докцм.	Підпис	Дата		

Аналіз особливостей влаштування інженерних систем в даних спорудах, зокрема систем вентиляції, надання рекомендацій щодо окремих випадків влаштування систем вентиляції та кондиціонування є важливим та актуальним. Аналіз ключових підходів до забезпечення мікроклімату в сховищах Швейцарії, Ізраїлю, США, Південної Кореї, Німеччини систематизовано у табл. 1.1 Розглянуті країни використовують як традиційні методи (наприклад, базові системи вентиляції), так і сучасні технології (системи автоматичного моніторингу та енергоефективності) [2].

Сильною стороною у системі цивільного захисту Швейцарії є високий рівень автономності – системи можуть функціонувати без електрики, що важливо в умовах кризи. Дану практику використання автономних систем можна рекомендувати для імплементації в Україні особливо віддалених регіонах або об'єктах без надійного електропостачання.

Перевагою у системі цивільного захисту Ізраїлю є герметичність укриттів і застосування комплексної системи фільтрації, що забезпечують захист від хімічних і біологічних загроз. Дану практику доцільно використовувати в Україні у зонах із підвищеним ризиком екологічних катастроф чи хімічних атак.

У системі цивільного захисту США сильною стороною є використання модулів аварійної вентиляції та автоматичного клімат-контролю для підтримання стабільної температури та вологості. Українські укриття можуть запозичити цей досвід і використовувати подібні технології для зон із сильними сезонними коливаннями температури [2].

Таблиця 1.1 – Світовий досвід забезпечення мікроклімату сховищ та укриттів

Країна	Системи забезпечення мікроклімату	Інноваційні рішення
1	2	3
Швейцарія	Високоєфективні фільтри для очищення повітря від пилу, радіації, хімічних речовин	Автономні системи вентиляції, що працюють навіть за відсутності електрики
Ізраїль	Системи кондиціонування повітря з фільтрацією від хімічних та біологічних агентів	Використання герметичних дверей та стін для підтримання стабільного мікроклімату

Продовження таблиці 1.1

1	2	3
США	Централізована вентиляція із запасними автономними модулями для аварійних ситуацій	Системи автоматичного контролю температури та вологості в укриттях
Південна Корея	Використання рекуператорів тепла для збереження енергії під час вентиляції	Інтеграція смарт-технологій для управління мікрокліматом у режимі реального часу
Німеччина	Акцент на енергоефективності, багатоступеневі фільтри повітря	Встановлення сонячних панелей для автономного живлення систем

У системі цивільного захисту Південної Кореї є рекуперація тепла та інтеграція смарт-технологій роблять системи економічно ефективними. Технології використання рекуператорів тепла для сховищ особливо ефективними можуть бути для великих укриттів, якими наразі в Україні слугують метро чи підземні паркінги.

Система цивільного захисту Німеччини відрізняється високим рівнем енергоефективності та використання відновлюваних джерел енергії (сонячні панелі). Використання сонячної енергії особливо актуальне для регіонів України із частими перебоями в електропостачанні [2].

Одним із найбільш суттєвих параметрів, що впливає на комфортність мікроклімату будь-якого приміщення у т.ч. укриттів (бомбосховищ) є температура повітря. Діючи вимоги [1] щодо температурного режиму приміщень передбачають перепади температури в межах 2-3 °С. Згідно встановлених нормативних показників, комфортна температура становить: 22-25 °С в теплу пору року; 18-22 °С взимку; температура для робочих приміщень – 18 °С. Підтримувати температуру (в вище наведених діапазонах) можливо лише за допомогою системи її автоматичного регулювання. Проте враховуючи інформаційну невизначеність (що обумовлюється відсутністю інформації) для визначення параметрів комфортності мікроклімату в укритті (бомбосховищах) потрібно розробляти та впроваджувати інтелектуальні системи управління. При цьому для прийняття обґрунтованого рішення щодо вибору структури інформаційної інтелектуальної системи слід враховувати кількість параметрів

					<i>КРМ.АКСМ-20.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докцм.	Підпис	Дата		14

мікроклімату, якими потрібно управляти [3]. В свою чергу кількість параметрів обирається згідно вимог стандарту ISO 7730 [4].

Приклад визначення зон комфортності мікроклімату за вимогами ISO 7730 наведено на рис. 1.1.

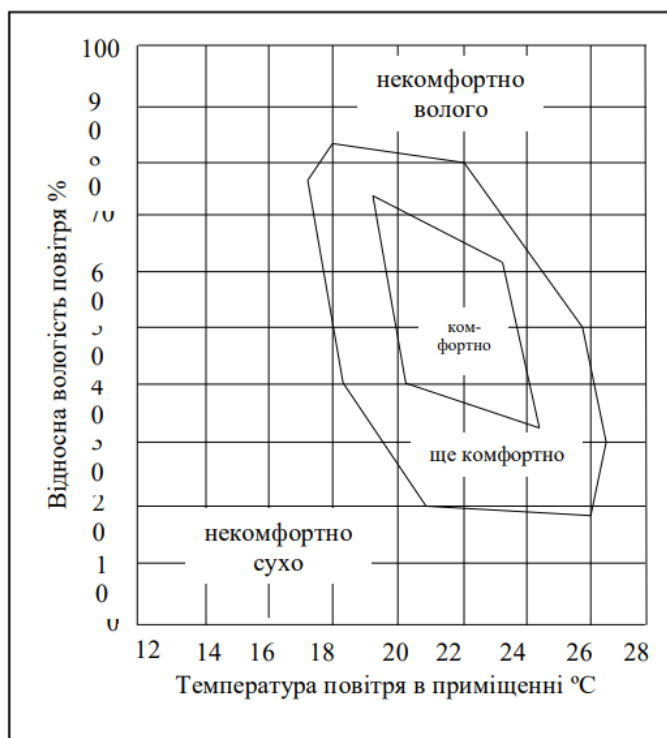
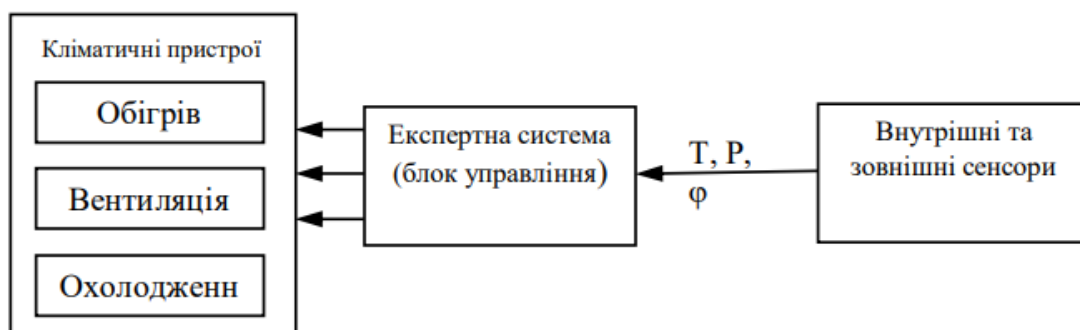


Рисунок 1.1 – Приклад комфортності згідно ISO 7730 [4]

Як видно з рис. 1.1 комфортність перебування в укритті (бомбосховищі) залежить від температури повітря та від його відносної вологості.

На рисунку 1.2 наведено узагальнену схему процесу регулювання мікроклімату за допомогою інтелектуальної системи:



Т – температура, Р – тиск, φ – відносна вологість

Рисунок 1.2 – Структурна система регулювання мікроклімату

Блок управління являє собою експертну систему, яка «навчається» протягом усієї своєї роботи. Тобто, поповнює або коригує свою базу знань в залежності від змін внутрішніх або зовнішніх факторів приміщення, обліку днів тижня або сезону року, в якому вона працює.

Сучасний розвиток і впровадження мікропроцесорної техніки дозволяє будувати системи регулювання комфортних умов мікроклімату з урахуванням показів значної кількості сенсорів. При цьому одним з пріоритетних конструктивних рішень є застосування технології виготовлення сенсорів декількох вимірювальних величин (температура, вологість, тощо) в одному конструктиві. Це дозволяє об'єднати всі сенсори в єдину вимірювальну мережу і тим самим зменшити похибку вимірювання. Тобто підвищити достовірність інформації, що контролюється і якість регулювання параметрів контролю.

На рис. 1.3 наведено типову структурну схему застосування мікроконтролеру для оцінки параметрів мікроклімату захисних споруд. Як видно з рис. 1.3 до системи моніторингу входять сенсори, які дозволяють проводити сканування мікроклімату бомбосховища за параметрами комфортності (температури, вологості, шуму, вібрації, тиску, освітлення, запилення, електромагнітного випромінювання, якості та складу повітря). При цьому мікроконтролер дозволяє опрацьовувати надану сенсорами інформацію щодо поточних значень цих параметрів та у разі необхідності розробляти коригуючі або попереджуючі заходи, щодо дотримання їх в заданих нормах [3].

					<i>КРМ.АКСМ-20.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докцм.	Підпис	Дата		16

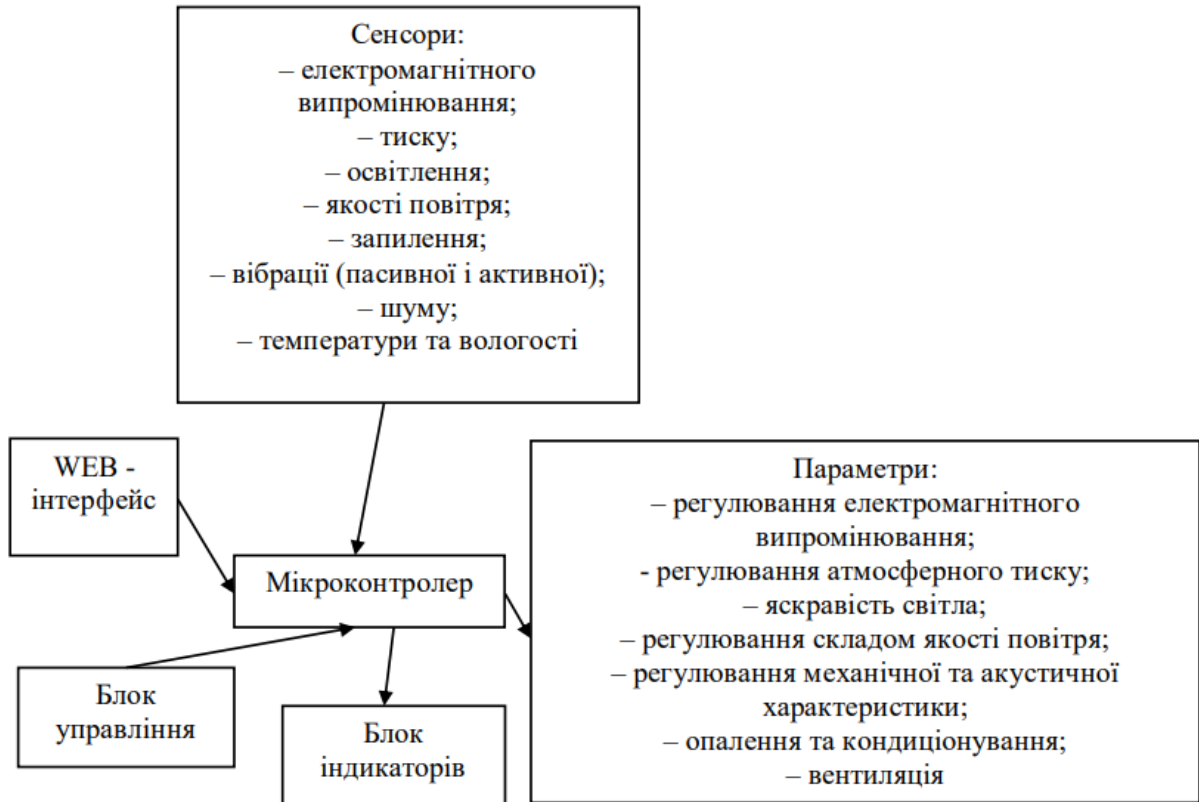


Рисунок 1.3 – Типова структурна схема контролю параметрів мікроклімату укриттів

У роботі [5] розглядається система SCADA-система на основі мікроконтролера для моніторингу фізичних параметрів в режимі реального часу, таких як температура, що має вирішальне значення для контролю мікроклімату. Це дозволяє реалізувати віддалений збір та аналіз даних, підвищуючи ефективність управління умовами навколишнього середовища приміщення.

У статті [6] розглянуто систему контролю температури з використанням SCADA та мікроконтролера ATMEGA2560 для моніторингу та управління умовами мікроклімату. Він використовує протокол MODBUS ASCII для збору даних в режимі реального часу та дій управління, демонструючи ефективні методи автоматизації.

У роботі [7] описується система для бездротового збору даних у реальному часі. Це необхідно для моніторингу всіх процесів і керування елементами, які на них впливають, оскільки у великих промислових

підприємствах одночасно виконуються кілька процесів. Досягти цієї мети можна за допомогою технології бездротової SCADA.

На SCADA-панелі можна змінювати такі параметри, як задане значення, нижня та верхня межі. Щойно температура з датчика опускається нижче встановленого рівня, мікропроцесор передає команду на відповідне реле. Відповідно до показників датчиків, підключені до реле польові пристрої перемикаються з увімкненого стану в вимкнений.

У статті [8] описано процес розробки автоматизованої системи керування та диспетчеризації на прикладі торговельного центру. Наведено алгоритми, які використовуються при побудові систем кондиціонування та вентиляції повітря, що дозволило виділити компоненти, до яких можливо застосувати енергозберігаючі закони управління. Запропоновано створення програмної частини, розділеної на бізнес-логіку у програмованому логічному контролері та візуалізацію у SCADA-системі з логуванням подій, заданням уставок. Складено перелік вхідних-вихідних сигналів, який дозволив підібрати обладнання для автоматизації. Розроблено структурну, функціональну схему підключення обладнання до контролерів. Описано перелік аварійних ситуацій, які можуть виникнути під час функціонування вентиляційної установки.

Серед переваг використання SCADA-системи [9] виокремлюються наступні: зменшення часу пусконаладжувальних робіт, часу внесення змін у проєкт та часу виявлення й усунення несправності. Впровадження системи моніторингу дозволило виявити раніше недиагностовані несправності обладнання. А в [10] розкрито наступні переваги: наочне відображення інформації, цілодобовий контроль технологічних процесів, зниження впливу людського фактору, швидка і достовірна діагностика стану об'єктів, авторизований доступ до інформації й управління, ведення журналу подій в автоматичному режимі.

Хоча системи SCADA пропонують значні переваги в контролі мікроклімату, такі проблеми, як ризики кібербезпеки та необхідність надійних

					<i>КРМ.АКСМ-20.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докцм.	Підпис	Дата		18

протоколів зв'язку, повинні бути вирішені для забезпечення цілісності та продуктивності системи.

У патенті України №112127 «Спосіб автоматичного регулювання параметрів мікроклімату в приміщенні» (заявка № а201501073, дата подання – 10 лютого 2015 року, дата публікації – 25 липня 2016 року), розробленому на базі Одеської національної академії харчових технологій, описується інноваційний підхід до управління умовами мікроклімату в житлових та адміністративних приміщеннях. Винахідниками є Муратов В.Г. та Ананський Д.В [11].

Згідно з міжнародною патентною класифікацією, даний спосіб належить до таких напрямів: F24F5/00 (системи кондиціонування повітря), G05D23/01 (регулювання вологості), G05D22/02 (регулювання температури) та G05D3/12 (загальні принципи автоматичного керування).

Суть розробки полягає у впровадженні автоматизованої системи, яка забезпечує регулювання мікрокліматичних параметрів на основі аналізу температури та відносної вологості. Контроль здійснюється шляхом зміни витрат води на зволоження повітря, а також частоти обертання електродвигуна холодильного компресора. Окрім цього, система враховує температуру на виході зонального зволожувача, що дозволяє адаптивно коригувати задані параметри. Особливістю способу є поєднання двох регульовальних впливів – положення квартирки та частоти обертання двигуна – в залежності від суми відхилень температури та її темпу зміни.

Перевагою зазначеного технічного рішення є висока точність та швидкодія системи, що робить його доцільним для застосування в умовах, де важливо дотримуватися стабільного мікроклімату (зокрема в музеях, архівах, спеціалізованих укриттях тощо). Винахід базується на аналізі попередніх технічних рішень, зокрема таких як FR 2621989 A1, WO 2004/055445 A1, WO 95/22725 A1, а також на напрацюваннях у вітчизняній технічній літературі.

Таким чином, представлений у патенті підхід дозволяє ефективно адаптувати систему регулювання мікроклімату до змін у середовищі,

					<i>КРМ.АКСМ-20.00.000 ПЗ</i>	Арк.
						19
Змн.	Арк.	№ докцм.	Підпис	Дата		

поєднуючи класичні принципи автоматизації з сучасними алгоритмами регулювання.

1.3 Принципи нормування та забезпечення умов перебування у захисних спорудах цивільного захисту

1.3.1 Фактори життєдіяльності захисних споруд та їхні показники

Захисні споруди, які є в населених пунктах і за їх межами, виконують важливу функцію – захист населення в період різного виду природних, виробничих катаклізмів, а також у період війни.

Захисні споруди – це цілий комплекс, який включає в себе не тільки свою споруду (приміщення), але й системи життєзабезпечення, без яких не може бути здійснений захист людей, які знаходяться в ній [14].

До цих систем належать:

- системи, які забезпечують температурно-вологий режим у споруді;
- системи повітропостачання вентиляції та регенерації;
- системи електропостачання;
- санітарно-технічні пристрої;
- системи використання шлюзування й герметизації.

Глибоке знання принципів устрою та роботи цих систем і пристроїв сприяє безперебійній їх роботі в різних режимах експлуатації споруди й забезпеченню захисту людей, які знаходяться в споруді.

До факторів життєдіяльності споруди належать:

- температура;
- вологість;
- газовий склад повітря;
- наявність і справність водопостачання й санітарно-технічних пристроїв;
- освітлення;
- звукоізоляція.

Температура та вологість у захисній споруді є важливим фактором життєдіяльності людини, яка знаходиться в захисній споруді. У США

					<i>КРМ.АКСМ-20.00.000 ПЗ</i>	Арк.
						20
Змн.	Арк.	№ докцм.	Підпис	Дата		

вважається гранично допустимою температура в захисній споруді 27 °С, у ФРН – 29,5 °С.

Прийнято оцінювати вплив на людину температури й вологості повітря за так званою ефективною температурою $T_{\text{еф}}$. Під $T_{\text{еф}}$ потрібно розуміти температуру при 100 % вологості (табл. 1.2).

Таблиця 1.2 – Оцінка впливу на людину температури та вологості повітря щодо ефективної температури

$T_{\text{еф}} 27\text{ °С}$		$T_{\text{еф}} 29,5\text{ °С}$	
Температура, °С	Відносна вологість, %	Температура, °С	Відносна вологість, %
27	100	29,5	100
28	85	30	96
29	75	31	90
32	46	35	56

Стан людини в захисній споруді також суттєво залежить від вище перелічених вище параметрів (табл. 1.3).

Таблиця 1.3 – Оцінка стану людини щодо параметрів повітря

Стан людини	Параметри повітря	
	Температура, °С	Відносна вологість, %
нормальний	21-24	56-70
самопочуття гірше, слабкість	29	90
слабкість, задуха, відчуття неспокою	30-32	90
небезпечне підвищення температури, частий пульс, прискорене дихання	33	90
надзвичайно небезпечне, швидке підвищення температури тіла	37	95-100

Газовий склад повітря: номінальний вміст у повітрі CO_2 – 0,03 %.

При підвищенні вмісту CO_2 – 2 % дихання людини стає глибшим, але помітного погіршення здоров'я не спостерігається.

При підвищенні CO_2 до 3,5 – 4 % з'являються головні болі, озноб, помітно погіршується серцева діяльність, знижується працездатність. У такому стані людина може перебувати тільки короткочасно.

При підвищенні CO₂ до 6 % проходить подальше погіршення серцевої діяльності.

Концентрацію CO₂ до 8 % людина може переносити лише короткочасно 30–40 хвилин.

Нормальною концентрацією CO₂ у сховищах вважається вміст CO₂ до 2 % і короткочасно (при переводі сховища на режим повної ізоляції) – 3-3,5 %.

Система водопостачання забезпечує людей водою для миття та гігієнічних потреб. Мінімальна витрата води становить 3 л/добу на 1 людину [14].

1.3.2 Системи повітропостачання та основи їх розрахунку

У захисних спорудах при режимі з постійним об'ємом повітря міняється склад повітря – наростає концентрація вуглекислого газу. При об'ємі повітря 1,3-1,5 м³ на 1 людину вміст вуглекислого газу через 2-2,5 год. Після заповнення й герметизації споруди може досягнути вже 3-4 %.

Час можливого перебування осіб залежно від об'єму повітря в захисній споруді (1.1):

$$t = \frac{C_{qon} \cdot V}{B \cdot 100}, \quad (1.1)$$

де, C_{qon} – гранично допустима концентрація вуглекислого газу, %;

V – об'єм повітря на 1 людину (1.2), л³ ;

B – кількість вуглекислого газу, який виділяється людиною, л/г.

$$V = \frac{V_{соопм^3}}{N_{люд}} \cdot 10^3. \quad (1.2)$$

У сховищах, які мають систему повітропостачання, факторами, які визначають можливість тривалого перебування людей у режимі укриття, є температура та вологість повітря.

Уже в перші 10-12 годин після заповнення в сховищах при подачі повітря 2 м³/г на 1 людину температура піднімається до 29-30 °С. Вміст вуглекислого газу при цьому не перевищує 1-1,5 %.

Кількість свіжого повітря, яке потрібне для підтримання в сховищі допустимих, які не перевищують межових значень температури й вологості,

					КРМ.АКСМ-20.00.000 ПЗ	Арк.
						22
Змн.	Арк.	№ докцм.	Підпис	Дата		

залежать від часу доби, року та кліматичних умов того району, де побудовано споруду.

Розміри водопостачання, які забезпечують у сховищах допустимі температури та вологість повітря залежно від кліматичних районів, приведені в ДБН В 2.2.5–97.

У місцях, де неможлива загазованість приземного повітря шкідливими речовинами та продуктами горіння, а також на об'єктах із виробництвом або споживанням СДЯВ, у сховищах слід передбачати режим регенерації внутрішнього повітря (режим – 3) і створення підпору згідно з додатком 1 ДБН В 2.2.5–97.

Кількість зовнішнього повітря, яке подається в сховище, потрібно приймати:

- при чистій вентиляції (режим – 1);
- при фільтровентиляції (режим – 2) – із розрахунку 2 м³/г на одного переховуваного, 5 м³/г на одного працюючого в приміщеннях пункту управління та 10 м³/г на одного працюючого в фільтровентиляційній камері з електроручними вентиляторами (табл. 1.4).

Таблиця 1.4 – Кількість зовнішнього повітря, яке подається в сховище щодо режиму регенерації внутрішнього повітря

Кліматичні зони, які розрізняються за параметрами А зовнішнього повітря			Кількість повітря, яке подається, м ³ /люд
Номер зони	Температура, °С	Тепловміст, ккал/кг	
1	до 20	до 10,5	8
2	від 20 до 25	від 10,5 до 12,5	10
3	від 25 до 30	від 12,5 до 14	11

Нормативи кількості повітря, яке подається, допускається використовувати при проектуванні. При прив'язці проєктів масового застосування та розробці індивідуальних проєктів, кількість повітря, яке подається в сховище при режимі 1 м³/г – чиста вентиляція, необхідно визначати за формулою (1.3):

$$L = \frac{Q_T}{1,2(I_b - I_n)} I, \quad (1.3)$$

де Q_T – кількість тепла, яке виділяється в сховище (від людей, електричного освітлення, електросилового обладнання), ккал/год;

I_n – тепло утримання зовнішнього повітря, яке відповідає середньомісячній температурі й вологості найспекотнішого місяця, ккал/кг;

I_b – тепловміст внутрішнього повітря, яке відповідає допустимим сполученням температури й вологості повітря, ккал/кг (визначається по графікам додатків 9 і 10 залежно від розрахункових тепловмісту I_n , вологовмісту I_b зовнішнього повітря щодо).

1.3.3. Захист населення в умовах надзвичайних ситуацій

Забезпечення безпеки населення в надзвичайних ситуаціях, обумовлених стихійним лихом, техногенними аваріями і катастрофами, а також використання сучасної зброї (воєнні надзвичайні ситуації) є загальнодержавною задачею, обов'язковою для вирішення всіма територіальними, відомчими і функціональними органами управління і регулювання, службами і формуваннями та суб'єктами господарювання [14].

Безпека населення в надзвичайних ситуаціях повинна забезпечуватися:

- пониженням вірогідності виникнення і зниженням можливих масштабів джерел природних, техногенних, екологічних і воєнних надзвичайних ситуацій;

- локалізацією, блокуванням, заглушенням, скороченням часу існування, масштабів і послабленням дії факторів ураження і джерел надзвичайних ситуацій;

- зниженням небезпеки ураження населення в надзвичайних ситуаціях шляхом пред'явлення і реалізації спеціальних вимог до розселення людей, раціональному розміщенню потенційно небезпечних та інших виробництв, транспортних та інших техногенних небезпечних і життєвоважних об'єктів і комунікацій, створенню об'єктів з внутрішньо притаманною безпекою і засобами локалізації і самоглушенням аварій, а також шляхом раціонального планування і забудови міст та інших населених пунктів, будівництва

					КРМ.АКСМ-20.00.000 ПЗ	Арк.
						24
Змн.	Арк.	№ докцм.	Підпис	Дата		

специфічних стійких в певних умовах надзвичайних ситуацій будинків і споруд, прийняття відповідних об'ємно-планувальних і конструктивних рішень;

- підвищенням стійкості функціонування систем і об'єктів життєзабезпечення і профілактики порушень їх роботи, які можуть створити небезпеку для життя і здоров'я населення;

- організацією і проведенням захисних заходів в відношенні до населення і персоналу аварійних та інших об'єктів при виникненні, розвитку і розповсюдженні факторів ураження джерел надзвичайних ситуацій, а також проведенням аварійно-рятувальних та інших невідкладних робіт щодо усунення безпосередньої небезпеки для життя і здоров'я людей, відновленню життєзабезпечення населення на територіях, що підверглися дії руйнівних і шкідливих сил природи і техногенних факторів; ліквідацією наслідків і реабілітації населення, територій і навколишнього середовища, що підверглися дії надзвичайних ситуацій [14].

Захист населення – це комплекс взаємопов'язаних за місцем, часом проведення, цілями, засобами заходів цивільної оборони, які спрямовані на усунення або зниження на потерпілих територіях до прийнятого рівня загрози життю і здоров'ю людей у випадку реальної небезпеки виникнення або в умовах реалізації небезпечних і шкідливих факторів стихійного лиха, техногенних аварій і катастроф.

Заходи щодо захисту людей від джерел надзвичайних ситуацій повинні плануватися в об'ємах, які гарантують не перевищення нормативної дії на них можливих факторів ураження для розрахункової надзвичайної ситуації.

В умовах виникнення надзвичайних ситуацій заходи щодо захисту населення повинні здійснюватися в об'ємах, які забезпечують неперебільшення допустимої нормативної дії на них реалізованих факторів ураження.

Якщо в умовах обставин, що склалися, встановленні нормативи допустимої небезпечної дії можуть бути перевищені, заходи щодо захисту людей підлягають проведенню за напрямками і в масштабах, що дозволяє максимально послабити їх дію.

					КРМ.АКСМ-20.00.000 ПЗ	Арк.
						25
Змн.	Арк.	№ докцм.	Підпис	Дата		

Потенційна загроза життю і здоров'ю населення в умовах надзвичайних ситуацій може реалізуватися внаслідок вивільнення в природне середовище проживання людини великої кількості концентрованої енергії, небезпечних і шкідливих для життя і здоров'я людей речовин і агентів при:

- безпосередньої дії на людей стихійної сили природи, факторів ураження техногенних аварій і катастроф, а також використання сучасних засобів збройної боротьби;

- вивільнення в природне середовище проживання людини великої кількості концентрованої енергії, небезпечних і шкідливих для життя і здоров'я людей речовин і агентів;

- руйнуванню енергонасичених та інших потенційно небезпечних об'єктів, установок і технічних систем промислового, експериментально-виробничого, дослідного і складського призначення;

- руйнуванню і критичному порушенні роботи систем або об'єктів життєзабезпечення населення в місцях його проживання.

Захисту в надзвичайних ситуаціях підлягає все населення з урахуванням чисельності і особливостей, що складають його основні категорії і групи людей на конкретних територіях: демографічних (вік, стать), за станом здоров'я (рівень загального опору організму дії екстремальних факторів ураження і несприятливих умов життя і побуту, фізична і психічна здатність до колективних і самостійних захисних дій та використанню засобів індивідуального захисту) і т. д. Ці особливості підлягають обліку при виборі ефективних, соціально обґрунтованих і економічно реальних варіантів захисту, відповідно специфіки контингентів, які необхідно захищати, при розробці планів захисту населення в надзвичайних ситуаціях на відповідних територіях, а також при організації і проведенню усесторонньої підготовки до виконання наміченого комплексу захисних заходів [14].

Використання комплексу заходів щодо захисту населення в умовах надзвичайних ситуацій повинно забезпечуватися:

					КРМ.АКСМ-20.00.000 ПЗ	Арк.
						26
Змн.	Арк.	№ докцм.	Підпис	Дата		

- організацією і виконанням безперервного спостереження, контролю і прогнозування стану природного середовища, виникнення і розвитку небезпечних для населення природних явищ, техногенних аварій і катастроф, (особливо можливого радіоактивного, хімічного і біологічного зараження) з урахуванням особливостей підконтрольних територій;

- своєчасним оповіщенням інстанцій, органів керівництва і управління, а також посадових осіб про загрозу виникнення надзвичайних ситуацій та їх розвитку, а також доведенням до населення встановлених сигналів і порядку дії в конкретній обстановці, що склалася;

- навчанням населення діям в надзвичайних ситуаціях і його психологічну підготовку;

- розробкою і здійсненням заходів щодо життєзабезпечення населення на випадок природних і техногенних надзвичайних ситуацій. Порядок, сили та засоби здійснення вказаних заходів цивільної оборони забезпечення, їх узгодженість в територіальних і галузевих ланках управління і виконання при вирішенні завдань досягнення безпеки населення в надзвичайних ситуаціях регламентуються окремими нормативними документами по лінії Міністерства України з питань надзвичайних ситуацій [14].

1.4 Огляд аналогів

Система на базі Інтернету речей для моніторингу температури листя рослин, параметрів повітря та ґрунту. Конфігурація запропонованої системи на рисунку 1.4. У цій роботі розроблено SCADA-систему для моніторингу двох рослин, позначених як Plant-1 та Plant-2. Використання двох рослин має дві основні мети [12].

По-перше, це дозволяє оцінити ефективність роботи сенсорних систем під час вимірювання параметрів різних рослин або умов.

По-друге, це дає змогу перевірити можливість масштабування запропонованої SCADA-системи до більш розгалуженої структури.

					<i>КРМ.АКСМ-20.00.000 ПЗ</i>	Арк.
						27
Змн.	Арк.	№ докцм.	Підпис	Дата		

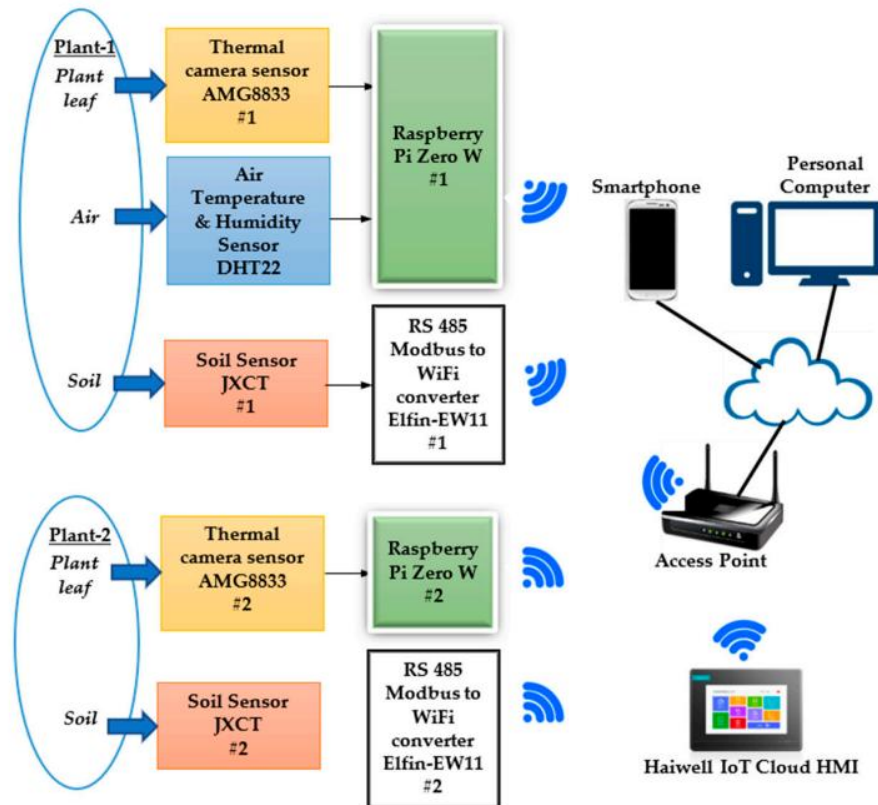


Рисунок 1.4 – Схема системи [12]

Як показано на рисунку 1.4, дана система включає наступні компоненти: сенсорні модулі, мікроконтролер Raspberry Pi Zero W, конвертер RS485 Modbus у Wi-Fi, точку доступу, HMI-панель Haiwell IoT Cloud, хмарну платформу Haiwell Cloud та комп'ютер або смартфон для дистанційного моніторингу.

Ключовим елементом системи є панель HMI Haiwell IoT Cloud, яка виконує функцію SCADA-системи з можливістю віддаленого доступу через інтернет, що реалізує концепцію IoT-орієнтованої SCADA. HMI з'єднується з польовими пристроями бездротово через Wi-Fi через точку доступу. HMI підтримує протокол Modbus TCP, що дозволяє легко інтегрувати інші пристрої, забезпечуючи гнучку конфігурацію системи.

Польові пристрої включають:

- сенсорні модулі;
- Raspberry Pi Zero W;
- конвертер RS485 Modbus у Wi-Fi.

Сенсорні модулі використовуються для вимірювання основних параметрів, а саме: температури листя, температури та вологості повітря, вологості ґрунту, температури ґрунту, рН, електропровідності та вмісту макроелементів.

У рамках цього дослідження термальна камера AMG8833 використовується для вимірювання температури листя. Вона з'єднана з Raspberry Pi Zero W за допомогою інтерфейсу I²C. Raspberry Pi здійснює термообробку зображень, збереження даних та їх передачу до НМІ через протокол Modbus TCP по Wi-Fi.

Сенсор DHT22 використовується для вимірювання температури та вологості повітря. Він підключений до Raspberry Pi Zero W через однопровідне з'єднання. Зчитані дані зберігаються та передаються до НМІ аналогічно до температури листя – бездротово через Modbus TCP.

Сенсор ґрунту JXCT використовується для вимірювання параметрів ґрунту: рН, температура, вологість, електропровідність та NPK. Сенсор має інтерфейс RS485 з протоколом Modbus RTU. Для бездротової передачі даних до НМІ використовується конвертер RS485 у Wi-Fi (Elfin-EW11). Такий підхід обрано для оцінки ефективності Wi-Fi-зв'язку між Raspberry Pi Zero W та Wi-Fi-конвертером при реалізації протоколу Modbus TCP.

НМІ-панель Haiwell IoT Cloud є пристроєм з вбудованим IoT-шлюзом та хмарним рушієм (Haiwell Cloud Engine), що забезпечує доступ до системи через Інтернет.

На рисунку 1.5 показано зовнішній вигляд головного меню інтерфейсу, що використовується для моніторингу стану рослин у режимі реального часу [12]. Меню складається з трьох основних зон моніторингу:

1. Ліва частина відображає параметри повітря.
2. Центральна частина відображає температуру листя.
3. Права частина відображає параметри ґрунту.

					<i>КРМ.АКСМ-20.00.000 ПЗ</i>	Арк.
						29
Змн.	Арк.	№ докцм.	Підпис	Дата		



Рисунок 1.6 – Вигляд сторінки системи [13]

Система Observis Smart Shelter забезпечує повну автоматизацію всіх критично важливих функцій укриття. Користувач може задавати заздалегідь визначені правила, за якими система буде реагувати на тривожні сигнали та зміни стану укриття. Укриття здатне функціонувати на повну потужність навіть за відсутності персоналу в пункті управління. Це забезпечує новий рівень оперативної готовності та швидку, точну реакцію на потенційні загрози.

Типові автоматизовані дії включають: автоматичне вмикання фільтрації та створення надлишкового тиску після серйозного СБРN-сигналу від детекторів; запуск системи видалення CO₂ при виявленні високих рівнів; зупинка забору повітря у разі зниження ефективності фільтрів; активація входів для деконтамінації після сигналу тривоги тощо.

Чітке візуальне уявлення про ситуацію є надзвичайно важливим під час кризи та надзвичайних ситуацій. Операторам потрібно негайно розуміти, що вони бачать, а не витратити час на спроби з'ясувати показники та їх значення. Система керування укриттям Observis ObSAS була розроблена як проста у використанні та зрозуміла. Усі показники відображаються у чіткому та

доступному форматі з візуальними й звуковими сигналами для різних станів і подій.

Система керування укриттям забезпечує наскрізне інформування операторів всередині приміщення, а також поза ним – як для операторів всередині укриття, так і для тих, хто перебуває за його межами. Інформація може передаватися до інших укриттів, будівель, а також до CBRNe-техніки й мобільних одиниць поза межами укриття. Це значно підвищує оперативні можливості під час кризи та надзвичайної ситуації.

Окрім безпосереднього управління кризовими подіями, ObSAS також надає інформацію про технічний стан систем укриття, таку як цифровий журнал обслуговування, інвентаризація запасних частин і витратних матеріалів, моніторинг ресурсу фільтрів, контроль якості повітря в приміщенні тощо.

Система керування укриттям забезпечує повний функціонал виявлення CBRNe-загроз. Завдяки апаратній незалежності укриття може бути оснащено найкращими доступними сенсорами та детекторами відповідно до оперативних вимог замовника. Залежно від типу, розміру та призначення укриття існують різні вимоги до виявлення CBRNe на входах, усередині укриття, на повітрязбірниках і за його межами.

Зазвичай один тип сенсорів не є оптимальним для всіх потреб CBRNe-виявлення в укриттях і на об'єктах критичної інфраструктури. Застосування кількох технологій підвищує надійність системи виявлення CBRNe.

Рішення ObSAS не прив'язує операторів до технологій чи продукції одного виробника. Натомість вони можуть обирати найкращі доступні технології, що відповідають їхнім конкретним і змінним потребам. Упродовж життєвого циклу експлуатації укриття та інші об'єкти критичної інфраструктури можуть бути оновлені, а обладнання – замінене. ObSAS забезпечує безперешкодну інтеграцію навіть під час модернізації, що суттєво підвищує функціональні можливості та надійність системи.

Системи Observis Smart Shelter включають eMaintenance – електронну систему технічного обслуговування, яка допомагає підтримувати укриття та

					<i>КРМ.АКСМ-20.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докцм.	Підпис	Дата		32

його компоненти в належному стані. Пристрої, підключені до програмного забезпечення ObSAS (рис. 1.7), відображаються автоматично, і користувач може додавати власні елементи за потреби. Кожен елемент має власну конфігурацію запасних частин, графік обслуговування та технічну документацію [13].

Список запасних частин оновлюється відповідно до потреб технічного обслуговування, а користувач отримує сповіщення, коли необхідно поповнити запаси.



Рисунок 1.7 – Структурна схема взаємодії компонентів системи ObSAS

Крім того, технічне обслуговування укриття може бути автоматизоване шляхом встановлення попередньо запланованих профілактичних дій, що дозволяє уникати невикористаних або термінових ремонтів. Це також гарантує безперервну працездатність укриття. У разі виявлення несправності або відмови обладнання технічний персонал отримає повідомлення негайно.

Висновки до розділу

У даному розділі виконано комплексний аналіз проблематики забезпечення нормативних мікрокліматичних умов у захисних спорудах

					<i>КРМ.АКСМ-20.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докцм.	Підпис	Дата		33

цивільного захисту в умовах сучасних викликів безпеці. Обґрунтовано, що переважна частина наявних укриттів не відповідає актуальним вимогам щодо автоматизованого контролю та керування параметрами внутрішнього середовища, що може негативно впливати на здоров'я, працездатність і безпеку людей під час тривалого перебування.

Проведений аналіз наукових публікацій, нормативних документів та патентних рішень засвідчив, що найбільш значущими параметрами мікроклімату в укриттях є температура, відносна вологість, газовий склад повітря (насамперед концентрація CO₂), вентиляція та енергоефективність систем життєзабезпечення. Показано, що ефективне підтримання цих параметрів можливе лише за умови застосування автоматизованих і, зокрема, інтелектуальних систем моніторингу та керування.

Аналіз світового досвіду підтвердив доцільність використання автономних, енергоефективних та смарт-орієнтованих рішень, а також SCADA- та IoT-підходів для забезпечення стабільного мікроклімату в укриттях різного призначення. Окрему увагу приділено системам з віддаленим доступом, автоматичною сигналізацією, логуванням подій та можливістю масштабування.

Розгляд існуючих аналогів і промислових рішень показав, що сучасні системи моніторингу мікроклімату поєднують багатоканальний збір даних із сенсорів, бездротові засоби передавання інформації, SCADA- або хмарні платформи візуалізації та елементи інтелектуального аналізу. Водночас виявлено недостатню кількість адаптованих рішень, спеціалізованих саме для захисних споруд цивільного захисту з урахуванням українських нормативних і експлуатаційних умов.

Отже, результати розділу підтверджують актуальність і доцільність розробки автоматизованої системи моніторингу мікроклімату для захисних споруд цивільного захисту, орієнтованої на інтеграцію сучасних сенсорних технологій, мікроконтролерних платформ і засобів візуалізації, що створює науково-обґрунтовану базу для подальшої розробки структурної схеми та технічних рішень системи.

					<i>КРМ.АКСМ-20.00.000 ПЗ</i>	Арк.
						34
Змн.	Арк.	№ докцм.	Підпис	Дата		

2 РОЗРОБКА АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ

2.1 Вимоги до апаратної частини та загальні принципи функціонування системи

Проектована система моніторингу мікрокліматичних параметрів укриття функціонує як інтегрований апаратно-програмний комплекс, призначений для безперервного вимірювання, локальної індикації та мережевої передачі показників якості повітря.

Система передбачає отримання низки мікрокліматичних параметрів, включно з температурою, відносною вологістю, концентрацією летких органічних сполук (TVOC), еквівалентним рівнем вуглекислого газу (eCO_2), індексом якості повітря (AQI), загальним ступенем хімічного забруднення повітря та показниками рівня шуму й освітленості. Для забезпечення коректного зчитування цих величин апаратна частина повинна підтримувати багатоканальну взаємодію з різномірними сенсорами, що працюють як за цифровими протоколами, так і на аналогових входах. Зокрема, взаємодія з газовими сенсорами ENS160 та AGS02MA реалізується через шину I²C, що зумовлює необхідність використання мікроконтролера з апаратною підтримкою даного інтерфейсу, можливістю налаштування адресних конфігурацій та забезпеченням стійкої роботи навіть за наявності кількох підключених пристроїв з різними часовими характеристиками.

Показники шуму та освітленості зчитуються через аналогові входи з подальшим цифровим перетворенням. Це потребує наявності в апаратній платформі АЦП не нижче 12-бітної роздільної здатності, стабільної опорної напруги та достатньої завадостійкості для запобігання паразитним коливанням сигналу, що впливають на точність усереднених значень. Додатково система має забезпечувати коректну роботу з датчиком температури та вологості DHT11, який використовує власний цифровий протокол із чітко регламентованими часовими параметрами. Отже, продуктивність мікроконтролера повинна

					КРМ.АКСМ-20.00.000 ПЗ	Арк.
						35
Змн.	Арк.	№ докцм.	Підпис	Дата		

гарантувати можливість надійного приймання сигналу без втрат та помилок у процесі декодування.

Важливою складовою є модуль бездротової комунікації, оскільки система реалізує передачу даних через локальну точку доступу Wi-Fi, створюючи замкнену мережеву інфраструктуру для користувацьких запитів. Це потребує використання контролера з інтегрованим Wi-Fi-модулем стандарту 802.11 b/g/n, здатного працювати в режимах точки доступу й вебсервера з одночасним обробленням HTTP-запитів та виконанням циклічного опитування сенсорів. З огляду на інтенсивність інформаційних потоків та наявність паралельних задач, необхідно забезпечити достатню продуктивність обчислювальної частини, що передбачає використання мікроконтролера з тактовою частотою не менше 80 МГц та обсягом оперативної пам'яті, достатнім для зберігання проміжних даних, реалізації буферизації та формування мережевих пакетів.

Локальна індикація забезпечується TFT-дисплеєм на базі контролера ST7789, що працює через інтерфейс SPI. Це зумовлює вимогу до апаратної платформи мати окремий апаратний модуль SPI з можливістю швидкісної передачі даних, необхідних для оперативного оновлення відображуваної інформації. Водночас конструкція має забезпечувати стабільне живлення для дисплейного модуля, газових сенсорів та мікроконтролера, оскільки коливання напруги можуть призводити до помилок у вимірюванні та деградації чутливих елементів. Коректна робота аналогових каналів потребує додаткових фільтраційних каскадів на лініях живлення, що мінімізують вплив електромагнітних завад.

Функціональна логіка системи передбачає циклічне оновлення сенсорних даних, виконання процедур цифрового згладжування, оброблення запитів вебсервера та генерацію графічного інтерфейсу дисплея протягом єдиного безперервного циклу. Це висуває вимоги до апаратної частини щодо забезпечення конкурентного доступу до периферійних модулів без блокування основних потоків обробки. Отже, апаратна платформа повинна мати

					<i>КРМ.АКСМ-20.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докцм.	Підпис	Дата		36

оптимізовану архітектуру шин, здатну підтримувати одночасну роботу I²C, SPI, Wi-Fi та аналогових модулів без критичних затримок.

Таким чином, на основі аналізу програмної реалізації та специфіки застосованих сенсорів сформовано комплекс вимог до апаратної частини системи, що забезпечує її точність, стабільність та функціональну повноцінність. Вони становлять базу для подальшого вибору апаратних компонентів, розроблення структурної схеми та побудови апаратної конфігурації системи моніторингу мікроклімату приміщень.

Узагальнення сформованих вимог до апаратної частини системи наведено в табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Вимоги до апаратної частини системи моніторингу мікроклімату

Функціональний елемент	Вимірюваний параметр / призначення	Тип інтерфейсу	Основні технічні вимоги
Газовий сенсор ENS160	TVOC, eCO ₂ , AQI, хімічне забруднення	I ² C	Підтримка апаратного I ² C, стабільна робота з кількома пристроями на шині
Газовий сенсор AGS02MA	Загальна концентрація VOC	I ² C	Адресна конфігурація, сумісність із I ² C-архітектурою ESP32
Датчик температури та вологості DHT11	Рівень акустичного шуму	Аналоговий вхід (ADC)	АЦП ≥ 12 біт, завадостійкість, фільтрація сигналу
Датчик освітленості	Рівень освітлення	Аналоговий вхід (ADC)	Стабільна опорна напруга, цифрове згладжування
TFT-дисплей ST7789	Локальна індикація параметрів	SPI	Апаратний SPI, висока швидкість передачі даних
Wi-Fi модуль (ESP32)	Бездротова передача даних, вебсервер	Wi-Fi 802.11 b/g/n	Робота в режимі AP, підтримка HTTP-запитів
Архітектура шин	Паралельна робота інтерфейсів	I ² C, SPI, ADC, Wi-Fi	Відсутність блокувань, мінімальні затримки

2.2 Архітектура апаратно-програмної системи моніторингу мікроклімату

Апаратно-програмна архітектура розроблюваної системи моніторингу мікроклімату базується на принципі інтеграції мультисенсорної платформи з модулем візуалізації та вбудованим вебінтерфейсом, що у сукупності забезпечує автономну, бездротову й безперервну реєстрацію та обробку параметрів внутрішнього середовища. Основою системи виступає мікроконтролер ESP32, який поєднує у собі високопродуктивний обчислювальний блок, апаратну підтримку мережних протоколів та розширений набір периферійних інтерфейсів, що дозволяє реалізувати модульну архітектуру із розподілом функцій між різними апаратними компонентами.

Логічну структуру системи (КРМ.АКСм – 20.00.000 С1) доцільно розглядати як багаторівневу модель, що включає сенсорний рівень, рівень обробки даних, рівень локального інтерфейсу користувача та рівень бездротової взаємодії. На сенсорному рівні здійснюється первинне вимірювання параметрів мікроклімату за допомогою кількох спеціалізованих сенсорних модулів. Датчик температури й вологості DHT11 забезпечує базові гігromетричні параметри. Модуль AGS02MA, який працює через інтерфейс I²C, формує оцінку загального вмісту летких органічних сполук, тоді як сенсор ENS160 виконує розширений хімічний аналіз якості повітря, надаючи показники TVOC, еквівалентної концентрації CO₂ та індексу AQI. Додатково система використовує аналогові сенсори освітленості та акустичного шуму, підключені до вбудованих ADC ESP32. Задля підвищення точності обробки аналогових сигналів застосовано механізми цифрового згладжування із використанням експоненціального фільтра.

Рівень обробки даних реалізується безпосередньо на платформі ESP32. Мікроконтролер виконує періодичне опитування всіх сенсорів із частотою 1 Гц, проводить нормалізацію отриманих значень, виконує лінеаризацію та логарифмічні перетворення (зокрема при розрахунку рівня шуму у децибелах),

					КРМ.АКСм-20.00.000 ПЗ	Арк.
						38
Змн.	Арк.	№ докцм.	Підпис	Дата		

а також здійснює контроль цілісності даних, використовуючи вбудовані механізми перевірки статусу ENS160. Застосування алгоритмів згладжування забезпечує зменшення впливу випадкових коливань, характерних для аналогових сенсорів, що підвищує стабільність відображених показників.

Локальний інтерфейс реалізовано у вигляді TFT-дисплея з використанням контролера ST7789, підключеного за протоколом SPI. Це дозволить забезпечити оперативну візуалізацію усіх контрольованих параметрів у реальному часі. На дисплей виводяться значення температури, вологості, освітленості, шуму, показники якості повітря ENS160, а також рівень TVOC та eCO₂. Кольорове кодування текстових елементів підвищує інформативність інтерфейсу та дає змогу інтуїтивно оцінювати стан мікроклімату.

Ключовою складовою архітектури є рівень бездротової взаємодії. ESP32 у режимі точки доступу формує Wi-Fi мережу, у межах якої розгортається вебсервер для віддаленого моніторингу. Обробник HTTP-запитів реалізує дві принципово різні функції: передавання статичної HTML-сторінки з адаптивною версткою та динамічне формування JSON-відповідей для періодичного оновлення даних на клієнтській стороні. Візуальна частина вебінтерфейсу базується на сучасних інструментах стилізації та інкапсулює логіку оновлення значень за допомогою JavaScript, що дозволяє створити повноцінний інформаційний портал реального часу без необхідності перезавантаження сторінки. Обмін даними між клієнтом і сервером відбувається за принципом періодичного асинхронного опитування, що мінімізує навантаження на мікроконтролер та забезпечує плавність оновлення інформаційних блоків.

Архітектура системи передбачає також інтеграцію механізмів станового контролю: для ключових параметрів мікроклімату (температура, вологість, CO₂, шум, освітлення) обчислюються статуси «норма», «попередження» або «критично». Це дозволяє користувачеві отримати не лише числові значення, а й їх інтерпретацію з огляду на нормативні або рекомендовані діапазони.

Таким чином, апаратно-програмна архітектура системи орієнтована на досягнення високої функціональної автономності, комплексності та

					<i>КРМ.АКСМ-20.00.000 ПЗ</i>	Арк.
						39
Змн.	Арк.	№ докцм.	Підпис	Дата		

адаптивності роботи. Завдяки поєднанню ESP32 як універсального ядра, мультисенсорних модулів та сучасних інструментів вебвізуалізації отримано інтегровану систему, здатну забезпечити безперервний моніторинг критичних параметрів мікроклімату та їх оперативне представлення користувачу у зручному та доступному форматі.

2.3 Датчики та модулі

2.3.1 Wi-Fi модуль ESP32 (LuaNode32)

Модуль ESP32-WROOM-32 (рис. 2.1) являє собою високоінтегровану платформу на базі двоядерного процесора Xtensa LX6 із тактовою частотою до 240 МГц, що поєднує функціональність бездротових інтерфейсів Wi-Fi та Bluetooth з розвиненим набором периферійних контролерів. Компактний форм-фактор і оптимальне співвідношення продуктивності та енергоспоживання роблять модуль ефективним рішенням для систем Інтернету речей та вбудованих застосувань.



Рисунок 2.1 – Модуль LuaNode32

Процесорна архітектура забезпечує виконання складних алгоритмів обробки сигналів, у тому числі DSP-операцій та задач машинного навчання. Інтегровані апаратні криптографічні акселератори (AES, SHA, RSA), а також підтримка Secure Boot і Flash Encryption гарантують високий рівень захисту, необхідний для безпечних IoT-рішень.

Сукупність режимів енергоспоживання, доповнена ULP-співпроцесором, дозволяє виконувати елементарні операції моніторингу без пробудження

					КРМ.АКСМ-20.00.000 ПЗ	Арк.
						40
Змн.	Арк.	№ докцм.	Підпис	Дата		

основного ядра, що значно підвищує енергоефективність. Модуль підтримує широкий спектр периферійних інтерфейсів, що забезпечує універсальність у системах автоматизації та телеметрії. Підтримка стандартів Wi-Fi 802.11b/g/n та Bluetooth v4.2 BR/EDR/BLE із механізмами коексистенції дозволяє реалізовувати багатопрокольні рішення з бездротовим зв'язком [15].

ESP32 LuaNode32 обрано за високу продуктивність, універсальність інтерфейсів і наявність вбудованого Wi-Fi, що робить його оптимальним для IoT-пристроїв.

2.3.2 Модуль датчика вологості та температури DHT11

Цифровий датчик температури й вологості DHT11 (рис. 2.2) є комплексним сенсорним модулем, що забезпечує калібрований цифровий вихід відповідних вимірювальних параметрів. Застосування спеціалізованої технології цифрової обробки сигналів у поєднанні з методами сенсорики температури та відносної вологості забезпечує високу надійність приладу та його тривалу стабільність під час експлуатації. Конструктивно сенсор поєднує резистивний елемент для визначення вологості та терморезистор NTC для вимірювання температури, інтегровані з високопродуктивним 8-бітним мікроконтролером.

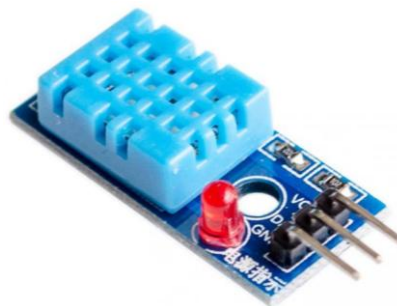


Рисунок 2.2 – Модуль датчика вологості та температури

DHT11 використовується в системах HVAC, обладнанні для тестування та інспекції, у споживчих електронних пристроях, автоматизованих системах керування, реєстраторах даних, метеорологічних станціях, побутовій техніці, регуляторах вологості, медичних приладах.

					КРМ.АКСМ-20.00.000 ПЗ	Арк.
						41
Змн.	Арк.	№ докцм.	Підпис	Дата		

До ключових експлуатаційних характеристик датчика належать низька собівартість, довготривала стабільність показників, можливість точного вимірювання відносної вологості та температури, висока якість виконання, швидка реакція на зміну умов, стійкість до електромагнітних завад, здатність до передавання сигналів на значні відстані, цифровий формат вихідних даних та точне заводське калібрування [16].

DHT11 обрано за простоту використання, низьку вартість і надійність вимірювань у базових IoT-проектах.

2.3.3 Модуль датчика звуку

Модуль датчика звуку від Waveshare (рис. 2.3) побудований на основі мікрофонного підсилювача LM386 та компаратора LM393. Він призначений для реєстрації акустичного фону навколишнього середовища та передавання відповідних даних у мікроконтролер або для подальшого підключення до аудіопідсилювального тракту через цифрові чи аналогові виходи з метою оцінювання й вимірювання інтенсивності звукового сигналу. Модуль легко інтегрується в типові системи за допомогою комплектних з'єднувальних перемичок. Коефіцієнт підсилення та поріг спрацювання можуть бути налаштовані за допомогою змінних резисторів, розміщених на друкованій платі.

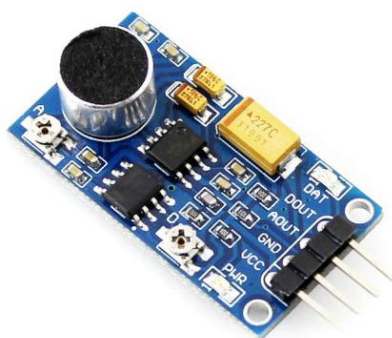


Рисунок 2.3 – Модуль датчика звуку

Мікросхема LM386 є інтегрованим малопотужним аудіопідсилювачем, що вирізняється низьким енергоспоживанням, можливістю регулювання внутрішнього коефіцієнта підсилення, широким діапазоном робочої напруги живлення, мінімальною потребою в зовнішніх компонентах та низьким рівнем

					КРМ.АКСМ-20.00.000 ПЗ	Арк.
						42
Змн.	Арк.	№ докцм.	Підпис	Дата		

нелінійних спотворень. Її застосування є доцільним у маловольтних споживчих пристроях.

Результати детекції контролюються через світловий індикатор, встановлений на модулі. Індикатор активується за наявності поблизу сенсора виразного звукового джерела та повертається в неактивний стан при його віддаленні. Крім цього, спостерігаються зміни значень послідовного виходу відповідно до зміни відстані між датчиком і джерелом звуку, що забезпечує можливість кількісного аналізу акустичної інтенсивності [17].

Датчик обрано для моніторингу рівня шуму у приміщенні завдяки простоті інтеграції та можливості кількісного аналізу звукової інтенсивності.

2.3.4 Датчик якості повітря AGS02MA

Датчик AGS02MA (рис. 2.4) є сенсором загальної концентрації летких органічних сполук, оснащеним спеціалізованою ASIC-мікросхемою, що використовує цифрову модульну технологію збору даних у поєднанні з сучасними методами газової сенсорики. Така архітектура забезпечує високу надійність, довготривалу стабільність параметрів, низьке енергоспоживання та підвищену чутливість. Кожен сенсор проходить повне калібрування та тестування перед поставкою, що гарантує його відповідність вимогам масштабних промислових застосувань.



Рисунок 2.4 – Датчик якості повітря

У конструкції сенсора (рис. 2.5) використано сучасну MEMS-технологію, що дає змогу сформувати мікротермічну пластину на кремнієвій підкладці.

					<i>КРМ.АКСМ-20.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докцм.	Підпис	Дата		43

Газочутливим матеріалом слугує напівпровідниковий металевий оксид, який характеризується низькою провідністю в чистому повітрі. Під час роботи сенсора зміна концентрації цільового газу спричиняє зміну електричної провідності цього матеріалу: зі зростанням концентрації збільшується і його провідність. Відповідно до цього принципу, спеціалізована інтегральна схема перетворює варіації провідності в вихідний сигнал, пропорційний концентрації газу в повітрі [18].

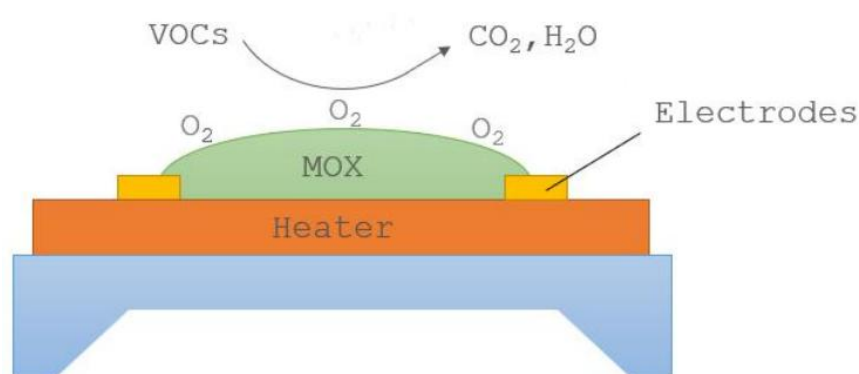


Рисунок 2.5 – Принцип роботи [18]

AGS02MA дозволяє ефективно відстежувати широкий спектр VOC у приміщенні з високою точністю та стабільністю.

2.3.5 Модуль датчика освітленості аналогово-цифровий

Модуль освітленості (див. рис. 2.6) на основі LM393 з фоторезистором GL5516 слугує для вимірювання інтенсивності світлового потоку, що потрапляє на чутливий елемент. Фоторезистор змінює свій опір залежно від рівня освітленості: зі збільшенням світла його опір зменшується. Після досягнення встановленого порогового значення компаратор LM393 формує на виході логічний сигнал «1». Рівень освітленості, за якого спрацьовує модуль, налаштовується резистором. Модуль має цифровий вихід, що забезпечує просту інтеграцію в системи автоматики та мікроконтролерні проекти.

					КРМ.АКСМ-20.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докцм.	Підпис	Дата		44

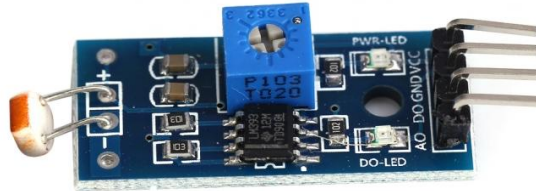


Рисунок 2.6 – Модуль датчика освітленості

Використання компаратора LM393 дозволяє забезпечити чітке порівняння вхідної аналогової напруги, утвореної на резистивному подільнику з фоторезистором, із встановленим порогом. Завдяки відкритому колектору виходу LM393 модуль може працювати з широким діапазоном логічних рівнів та легко інтегрується у різні мікроконтролерні архітектури. Висока швидкодія порівняння дає змогу використовувати модуль у задачах, де важливо оперативно реагувати на зміну освітленості.

Фоторезистор GL5516 є елементом з широким динамічним діапазоном чутливості. Він демонструє значні зміни опору, що забезпечує добру відтворюваність сигналу в умовах різної інтенсивності світла. Завдяки цьому модуль придатний як для грубих порогових вимірювань, так і для попередньої оцінки рівня освітленості перед передаванням даних до системи обробки [19].

GL5516 із LM393 обрано за простоту інтеграції, широкий динамічний діапазон і здатність швидко реагувати на зміни освітлення.

2.3.6 Датчик якості повітря та концентрації вуглекислого газу

Датчик ENS160 (рис. 2.7) є цифровим багатокомпонентним газовим сенсором, побудованим на металоксидній технології та оснащеним чотирма незалежними чутливими елементами. Завдяки автономному керуванню нагрівальними пластинами кожного елемента забезпечується високочутливе виявлення широкого спектра летких органічних сполук (VOCs), включно з етанолом, толуолом, воднем та низкою окиснювальних газів.

					<i>КРМ.АКСМ-20.00.000 ПЗ</i>	Арк.
						45
Змн.	Арк.	№ докцм.	Підпис	Дата		

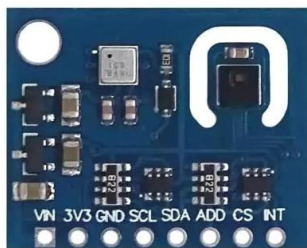


Рисунок 2.7 – Датчик ENS160

ENS160 використовує вбудовані інтелектуальні алгоритми для обробки вимірних сирих даних безпосередньо на кристалі. Ці алгоритми виконують обчислення еквівалентної концентрації CO₂, загального вмісту летких органічних сполук (TVOC), індексів якості повітря (AQI), а також корекцію показників відповідно до температури й вологості та довгострокове управління базовим рівнем сенсора. За потреби користувач може зчитувати необроблені дані для реалізації власних алгоритмів аналізу.

Для забезпечення адаптивності до широкого спектра прикладних сценаріїв сенсор ENS160 формує ряд вихідних параметрів, що характеризують якість повітря у замкнених приміщеннях. Ці параметри отримуються шляхом обробки базових вимірювань відповідно до міжнародних стандартів та усталених галузевих методик, які на сьогодні виконують роль стандартів де-факто у сфері аналітики якості повітря. У таблиці 2.2 подано узагальнену систематизацію таких вихідних сигналів.

Таблиця 2.2 – Вихідні характеристики сигналів якості повітря

Параметр	Діапазон	Роздільна здатність	Одиниці вимірювання
TVOC	0 – 65,000	1	мм ³ /м ³
eCO ₂	400 – 65,000	1	см ³ /м ³
AQI	1 до 5	1	-

Реалізовані в ENS160 перевірені алгоритми TrueVOC мінімізують дрейф сенсора та вплив старіння чутливих елементів, забезпечуючи довготривалу стабільність показників. Завдяки цьому вихідний параметр eCO₂ (еквівалентна концентрація CO₂) у сенсорі ENS160 слугує економічно ефективною

альтернативою або доповненням до традиційних CO₂-сенсорів у системах вентиляції та кондиціонування повітря.

У таблиці 2.3 наведено типову класифікацію рівнів еквівалентної концентрації CO₂.

Таблиця 2.3 – Інтерпретація CO₂ та eCO₂ значень

Вивід		Пояснення
eCO ₂ / CO ₂	Оцінка	
>1500	Дуже погано	Провітрювання / Вентиляція необхідна
1000 – 1500	Погано	Провітрювання / Рекомендована вентиляція
800 – 1000	Задовільно	Можлива вентиляція
600 – 800	Добре	Середні значення
400 – 600	Відмінно	Нормальний показник

Як приклад, у системах вентиляції, що працюють на основі контролю за CO₂ або eCO₂, швидкості роботи вентиляторів можуть відповідати трьом верхнім рівням класифікації — «Добре», «Задовільно» та «Погано», — які тригерять режими вентиляції 1, 2 та 3 відповідно. Це забезпечує адаптивне та енергоефективне регулювання повітрообміну залежно від фактичного стану якості повітря в приміщенні.

У таблиці 2.4 наведено шкалу AQI-UBA, яка визначає якісну оцінку повітря на основі рівня TVOC. Кожен рівень індексу відповідає певному діапазону концентрацій органічних сполук і характеризує повітря як «дуже добре», «добре», «задовільне», «погане» або «дуже погане». Такий підхід дозволяє швидко інтерпретувати стан повітря в контексті можливого хімічного забруднення та рівня комфортності приміщення для людини.

Таблиця 2.4 – Індеси якості повітря

AQI-UBA		TVOC		Гігієнічна оцінка	Рекомендація	Ліміт впливу
№	Оцінка	мг/м ³	см ³ /м ³			
1	2	3	4	5	6	7
5	Дуже погане	10 – 25	2.2 – 5.5	Ситуація неприйнятна	Посилена вентиляція	Години
4	Погане	3 – 10	0.65 – 2.2	Серйозні порушення	Посилена вентиляція	<1 місяця

Продовження таблиці 2.4

1	2	3	4	5	6	7
3	Задовільне	1 – 3	0.22 – 0.65	Незначні порушення	Посилена вентиляція / Пошук джерела	<12 місяців
2	Добре	0.3 – 1	0.065 – 0.22	Немає суттєвих відхилень	Рекомендація вентиляції	Без обмежень
1	Дуже добре	<0.3	0 – 0.065	Немає відхилень	Ціль	Без обмежень

Індекс AQI-UVA формується відповідно до рекомендацій Федерального агентства з охорони довкілля Німеччини і базується на сумарному показнику концентрації летких органічних сполук. Незважаючи на те, що методика має національне походження та була розроблена для внутрішнього використання в Німеччині, вона отримала широке поширення та була адаптована багатьма країнами й організаціями як практична та інформативна система класифікації якості повітря в приміщеннях.

Індекс AQI-UVA широко застосовується в інтелектуальних системах моніторингу, вентиляції та управління мікрокліматом, оскільки він забезпечує просту, але інформативну метрику якості повітря. У поєднанні з цифровими VOC-сенсорами, такими як ENS160, цей індекс дає змогу здійснювати автоматизоване керування повітрообміном, оптимізувати енергоспоживання та підтримувати сприятливі умови для перебування людей у закритих приміщеннях [20].

ENS160 обрано для комплексного контролю якості повітря та CO₂ з автоматизованим управлінням вентиляцією та точним відображенням індексів AQI і TVOC.

2.4 Середовище програмування Arduino IDE

Arduino IDE (див. рис. 2.8) є інтегрованим середовищем розробки, призначеним для створення, налагодження та завантаження програмного забезпечення у мікроконтролерні платформи сімейства Arduino. Середовище поєднує текстовий редактор, компілятор і засоби завантаження коду,

					КРМ.АКСМ-20.00.000 ПЗ	Арк.
						48
Змн.	Арк.	№ докцм.	Підпис	Дата		

забезпечуючи повний цикл розробки в межах єдиної програмної оболонки. Завдяки підтримці мови програмування, синтаксично близької до C/C++, Arduino IDE надає можливість ефективного використання апаратних ресурсів мікроконтролера.

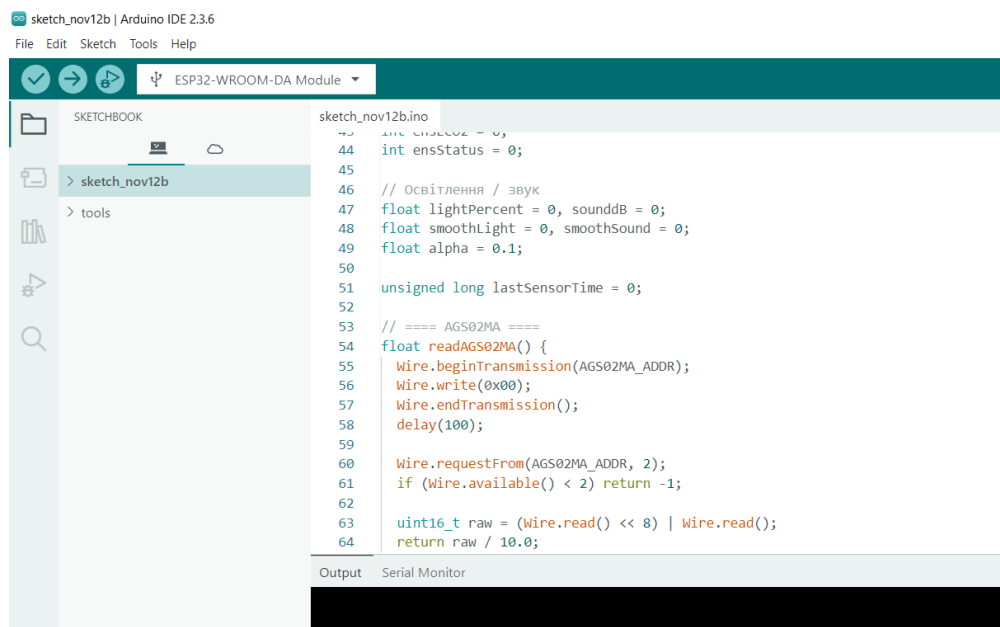


Рисунок 2.8 – Вигляд середовища Arduino IDE

Однією з ключових переваг Arduino IDE є її модульність. Середовище підтримує розширення функціональності за допомогою бібліотек, що забезпечують роботу з датчиками, виконавчими механізмами, протоколами зв'язку та складнішими периферійними інтерфейсами. Система керування бібліотеками дає змогу швидко інтегрувати у проєкт готові програмні модулі, що суттєво прискорює процес розробки та спрощує взаємодію з апаратними компонентами. Завдяки цьому Arduino IDE успішно використовується для реалізації як експериментальних прототипів, так і повноцінних вбудованих систем.

Середовище підтримує роботу з широким спектром апаратних платформ, включно з мікроконтролерами AVR, ARM Cortex-M та ESP-архітектурами. Функціонал серійного монітора й осцилографічних інструментів забезпечує можливість діагностики, моніторингу та тестування програмних модулів у реальному часі, що є важливим елементом при розробці систем збору даних і

					<i>KPM.AKCM-20.00.000 ПЗ</i>	Арк.
						49
Змн.	Арк.	№ докцм.	Підпис	Дата		

керування [21]. Застосування Arduino IDE у межах цього дослідження дозволяє забезпечити відтворюваність експериментів, стандартизований процес розробки та ефективну інтеграцію програмної частини з апаратними компонентами вимірювальної системи.

2.5 Серверна частина на ESP32

Модуль ESP32 працює в режимі точки доступу (Access Point, AP), він створює власну бездротову мережу, формуючи її SSID (ідентифікатор мережі), пароль доступу та IP-адресу. Інші пристрої, зокрема смартфони або персональні комп'ютери, можуть здійснити пошук цієї мережі та під'єднатися до неї, використовуючи заздалегідь визначений ключ доступу. Завдяки призначеній IP-адресі ESP32 може безпосередньо надавати вебінтерфейс або окремі вебсторінки всім під'єднаним користувацьким пристроям [22]. На рисунку 2.9 зображено схему підключення.

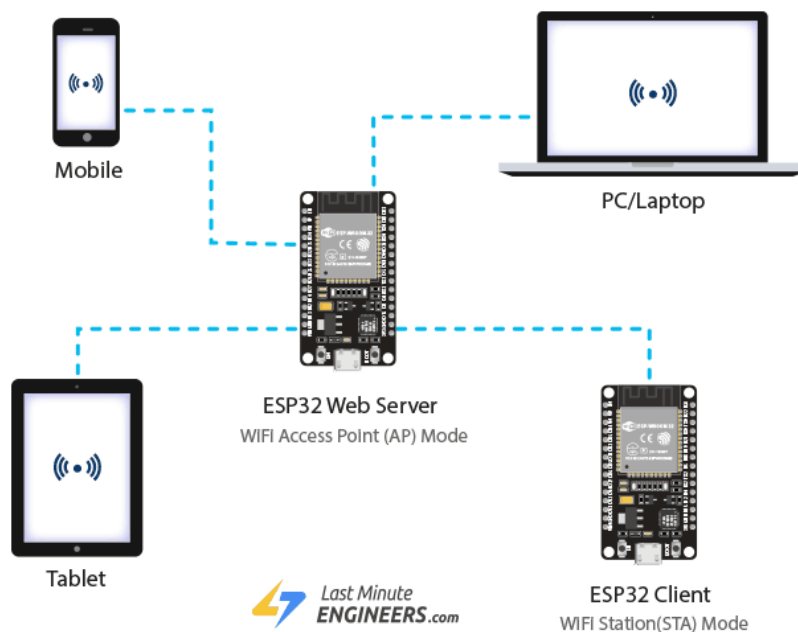


Рисунок 2.9 – Схема підключення в режимі AP [22]

Застосування режиму AP є особливо доцільним у випадках, коли у зоні розгортання системи відсутня наявна інфраструктура Wi-Fi або коли необхідно забезпечити ізольовану, незалежну від зовнішніх мереж точку доступу. Наприклад, під час експлуатації автоматизованої системи моніторингу

					KPM.AKCM-20.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ доцм.	Підпис	Дата		50

мікрокліматичних параметрів у захисних спорудах цивільного захисту, які можуть бути розташовані у місцях без доступу до Інтернету, модуль ESP32 у режимі точки доступу забезпечує можливість прямого підключення технічного персоналу через мобільний пристрій для контролю та налаштування системи.

Для роботи із сервером необхідно підключити дві бібліотеки: `WiFi.h` та `WebServer.h`. Бібліотека `WiFi.h` забезпечує можливість встановлення з'єднання ESP32 з наявною Wi-Fi мережею, тоді як `WebServer.h` надає інструментарій для реалізації вебсерверу, здатного обробляти HTTP-запити від веббраузера. Нижче наведено фрагмент коду.

```
#include <WiFi.h>
#include <WebServer.h>
```

Перед завантаженням програми до мікроконтролера необхідно задати назву мережі (SSID) та пароль, які визначатимуть параметри створюваної Wi-Fi мережі. Ці значення використовуються для подальшого підключення клієнтських пристроїв.

```
const char* ssid = "ESP32";
const char* password = "12345678";
```

Далі створюється об'єкт бібліотеки `WebServer`. Під час ініціалізації йому задається прослуховування порту 80. Це стандартний порт для HTTP-трафіку, що дозволяє уникнути необхідності вручну визначати порт у браузері під час доступу до вебінтерфейсу.

Після підключення клієнтського пристрою до Wi-Fi мережі, сформованої модулем ESP32, у веббраузері необхідно ввести IP-адресу 192.168.4.1. Цю адресу було задано в програмному коді під час конфігурації модуля у режимі точки доступу.

Висновки до розділу

У розділі 2 здійснено комплексний аналіз та проектування автоматизованої апаратно-програмної системи моніторингу мікрокліматичних параметрів укриттів, орієнтованої на автономну роботу в умовах обмеженої або відсутньої мережевої інфраструктури. Сформульовано обґрунтовані вимоги до апаратної частини системи з урахуванням особливостей використовуваних

									Арк.
									51
Змн.	Арк.	№ докцм.	Підпис	Дата					

сенсорів, характеру вимірюваних величин та необхідності одночасної підтримки цифрових і аналогових каналів збору даних.

Розроблена архітектура системи базується на використанні мікроконтролера ESP32 як центрального обчислювального та комунікаційного вузла, що забезпечує інтеграцію мультисенсорної платформи, локальної візуалізації та вебінтерфейсу віддаленого доступу. Запропонована багаторівнева модель архітектури, яка включає сенсорний рівень, рівень обробки даних, рівень локального інтерфейсу та рівень бездротової взаємодії, дозволяє чітко структурувати функціональні обов'язки компонентів і забезпечує масштабованість та адаптивність системи.

Проаналізовано принципи роботи та технічні характеристики ключових сенсорних модулів. Показано доцільність їх вибору з позицій точності, стабільності, простоти інтеграції та відповідності завданням комплексного моніторингу якості повітря.

Обґрунтовано вибір середовища розробки Arduino IDE як універсальної платформи програмування, що забезпечує стандартизований підхід до створення вбудованого програмного забезпечення, ефективну роботу з бібліотеками периферійних пристроїв та зручні інструменти налагодження. Розглянуто реалізацію серверної частини на базі ESP32 у режимі точки доступу, що дозволяє створити ізольовану бездротову мережу з вебінтерфейсом для оперативного контролю параметрів мікроклімату без залучення зовнішніх мереж.

У підсумку розділ формує цілісну концептуальну та технічну основу для подальшої реалізації програмних алгоритмів обробки даних, розроблення користувацького інтерфейсу та експериментальної перевірки працездатності системи. Отримані результати підтверджують доцільність обраних апаратних і програмних рішень та створюють передумови для впровадження розробленої системи у практичні задачі моніторингу мікроклімату в приміщеннях різного функціонального призначення.

					<i>КРМ.АКСМ-20.00.000 ПЗ</i>	Арк.
						52
Змн.	Арк.	№ докцм.	Підпис	Дата		

3 РЕАЛІЗАЦІЯ СИСТЕМИ

3.1 Загальний опис

На рисунку 3.1. представлено зібраний зразок автоматизованої системи моніторингу мікрокліматичних параметрів, змонтований у спеціально підготовленому корпусі. Конструкція включає мікроконтролерний модуль на базі ESP32, до якого під'єднано комплекс сенсорних модулів та графічний індикатор для локального відображення вимірянних даних.



Рисунок 3.1 – Вигляд стенду

У верхній частині пристрою розміщено кольоровий TFT-дисплей, що забезпечує візуалізацію показників у реальному часі. На екрані відображаються значення температури, відносної вологості, рівнів летких органічних сполук,

					КРМ.АКСМ-20.00.000 ПЗ	Арк.
						53
Змн.	Арк.	№ докцм.	Підпис	Дата		

концентрації CO₂, індексу якості повітря, освітленості, а також рівня звуку. Це дає змогу оперативно оцінювати стан мікроклімату без необхідності підключення до зовнішніх пристроїв.

У центральній частині корпусу встановлено низку сенсорних модулів, кожен з яких виконує вимірювання окремого параметра. Серед них — датчики температури та вологості, датчики газового складу повітря, модуль освітленості та модуль контролю рівня звуку. Кожен сенсор підключений до ESP32 за допомогою дротових інтерфейсів, що забезпечують стабільний обмін даними.

У нижній частині конструкції закріплено модуль ESP32, який виконує функції центрального обчислювального блока. Через інтерфейс USB здійснюється подача живлення та можливість прошивання пристрою. ESP32 забезпечує опрацювання даних датчиків, формування вихідних повідомлень, роботу вбудованого вебінтерфейсу та, за потреби, створення локальної Wi-Fi мережі у режимі точки доступу.

Загальна апаратна схема характеризується модульною структурою, що спрощує модернізацію системи та можливість заміни або доповнення функціональних блоків. Компоновка надає доступ до основних елементів, що є важливим для проведення технічного обслуговування й подальших експериментальних досліджень.

Представлена конструкція є завершеним прототипом апаратної частини автоматизованої системи моніторингу, придатним для подальшої інтеграції у стаціонарні умови захисних споруд цивільного захисту.

3.2 Вебінтерфейс системи

Для забезпечення доступу до результатів моніторингу в розробленій системі реалізовано режим роботи мікроконтролера ESP32 як точки доступу Wi-Fi. Це дозволяє користувачу підключатися до системи без використання зовнішнього маршрутизатора та отримувати дані безпосередньо з пристрою.

Після подачі живлення ESP32 автоматично ініціалізує бездротову мережу з такими параметрами:

					<i>КРМ.АКСМ-20.00.000 ПЗ</i>	Арк.
						54
Змн.	Арк.	№ докцм.	Підпис	Дата		

- назва мережі (SSID): ESP32-Access-Point;
- тип захисту: WPA2-PSK;
- пароль доступу: 12345678.

Підключення до системи здійснюється стандартними засобами операційної системи користувача (ПК, планшет або смартфон) шляхом вибору відповідної Wi-Fi мережі та введення пароля (рис. 3.2). Після успішного підключення пристрій користувача отримує IP-адресу в локальній мережі ESP32.

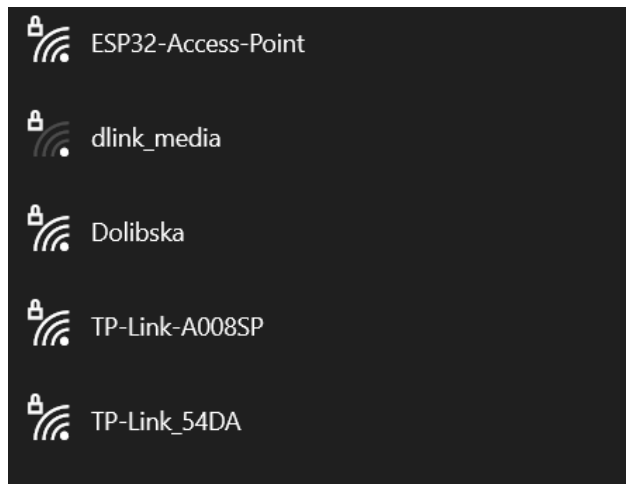


Рисунок 3.2 – Назва мережі

Для доступу до вебінтерфейсу системи необхідно відкрити будь-який веббраузер та в адресному рядку ввести адресу вбудованого сервера: <http://192.168.4.1>.

Після переходу за вказаною адресою автоматично завантажується головна сторінка вебінтерфейсу, яка відображає поточні значення мікрокліматичних параметрів у режимі реального часу. Оновлення даних відбувається автоматично без необхідності перезавантаження сторінки (рис. 3.3).

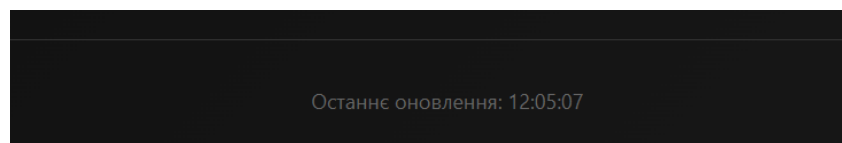


Рисунок 3.3 – Оновлення даних сервера

Вебінтерфейс реалізований у цьому проєкті, являє собою інтерактивну платформу для віддаленого моніторингу мікрокліматичних умов у захисних

					<i>КРМ.АКСМ-20.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докцм.	Підпис	Дата		55

спорудах цивільного захисту (рис. 3.4). Основною метою інтерфейсу є надання користувачу можливості в режимі реального часу отримувати інформацію про стан повітря, температуру, вологість, рівень освітлення, концентрацію вуглекислого газу та інтенсивність звуку. Вебінтерфейс створено для забезпечення максимально інтуїтивного та візуально зрозумілого представлення даних, що отримуються від різних сенсорів, підключених до мікроконтролера.

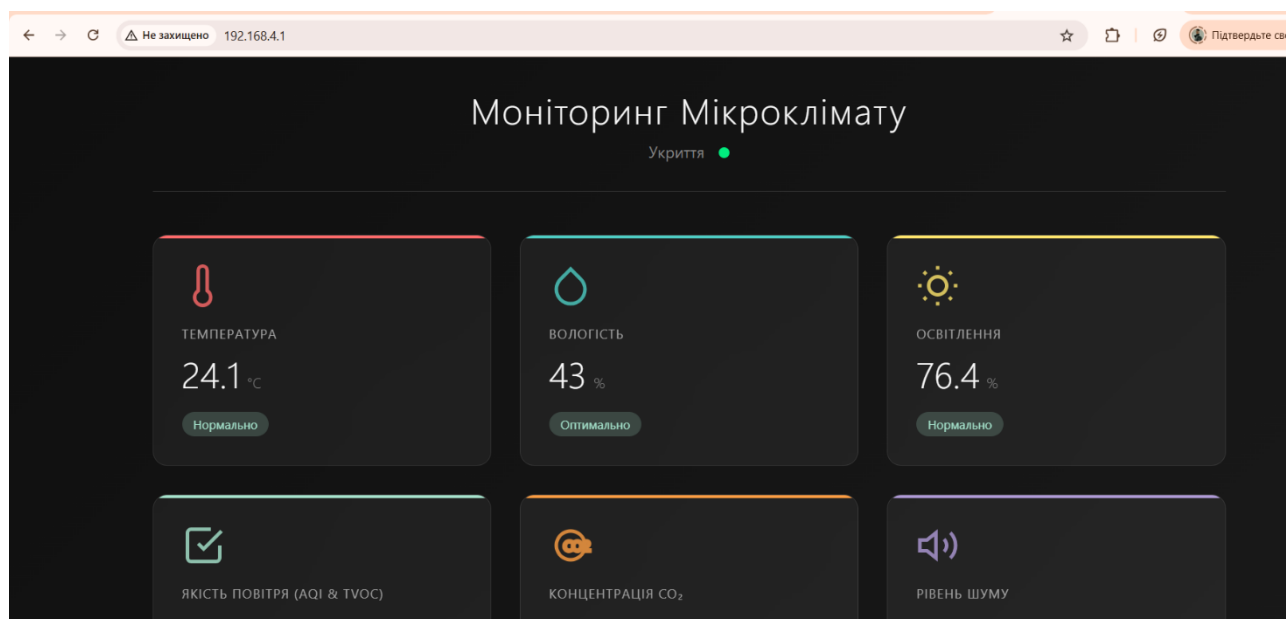


Рисунок 3.4 – Вигляд інтерфейсу

Вебінтерфейс побудований на основі вбудованого вебсервера ESP32, який ініціалізується у режимі точки доступу Wi-Fi, що дозволяє користувачу підключатися безпосередньо до ESP32 без потреби в зовнішньому маршрутизаторі. Сервер обробляє HTTP-запити на стандартному порту 80 і диференціює їх за типом:

- запит на основну HTML-сторінку – використовується для завантаження статичної вебсторінки, яка містить структуру інтерфейсу, стилі та JavaScript для динамічного оновлення даних;

- запит на отримання даних у форматі JSON – використовується для отримання актуальних показників від сенсорів, що дозволяє відобразити реальний стан мікроклімату без необхідності перезавантаження сторінки.

					<i>КРМ.АКСМ-20.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докцм.	Підпис	Дата		56

Цей підхід дозволяє розділити логіку відображення інтерфейсу та логіку передачі даних, що забезпечує безперервне оновлення інформації та плавну взаємодію користувача з вебсторінкою.

Інтерфейс спроектовано з акцентом на сучасний та зрозумілий візуальний стиль. Основний фон виконано у вигляді градієнта від темного до більш світлого відтінку, що створює ефект глибини та контрастності для кращого сприйняття інформації. Карти показників мають прозоре тло та ефект розмиття, що додає відчуття сучасності та зменшує перевантаженість сторінки.

Інтерфейс повністю адаптивний і оптимізований для різних розмірів екранів: десктопних, планшетних та мобільних пристроїв. Для цього використано CSS Grid, який дозволяє розташовувати картки у гнучкій сітці, що автоматично підлаштовується під ширину екрана. Додатково медіа-запити CSS забезпечують масштабування тексту та зміни відступів, що робить інтерфейс зручним для перегляду на невеликих екранах.

Основні структурні елементи сторінки:

- Header: включає заголовок системи («Моніторинг Мікроклімату Укриття») та індикатор активності системи у вигляді зеленого круга, що пульсує (див. рис. 3.4). Цей елемент сигналізує користувачу про те, що система працює та відображає актуальні дані;

- Metrics Grid: основний блок інтерфейсу, що містить шість карток-показників (див. рис. 3.4), кожна з яких відповідає за конкретний параметр мікроклімату:

1. Температура (рис. 3.5) – показує актуальну температуру у градусах Цельсія та включає індикатор стану: «Нормально» (зелений) або «Увага» (жовтий), якщо температура виходить за межі комфортного діапазону (18–26 °C).

					<i>КРМ.АКСМ-20.00.000 ПЗ</i>	Арк.
						57
Змн.	Арк.	№ докцм.	Підпис	Дата		

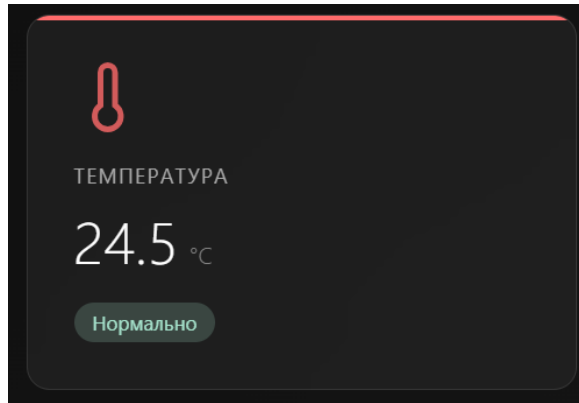


Рисунок 3.5 – Вигляд картки температури

2. Вологість (рис. 3.6) – відображає відносну вологість повітря у відсотках. Статус відображається як «Оптимально» (зелений) при 40–70% і «Увага» (жовтий) поза межами цього діапазону.

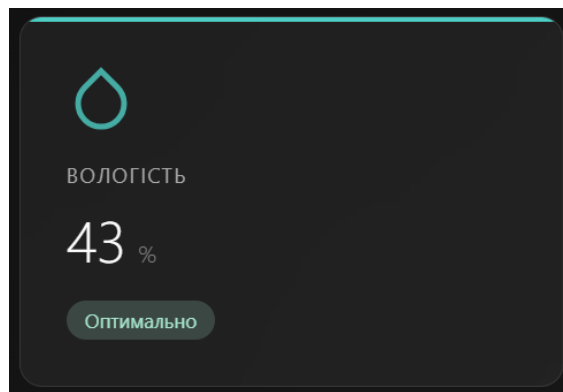


Рисунок 3.6 – Вигляд картки вологості

3. Освітлення (рис. 3.7) – вимірюється у відсотках від максимальної освітленості та сигналізує про низький рівень світла, якщо він менше 30%.

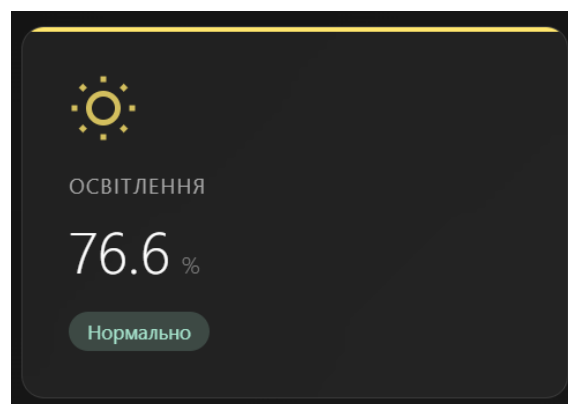


Рисунок 3.7 – Вигляд картки освітлення

					КРМ.АКСМ-20.00.000 ПЗ	Арк.
						58
Змн.	Арк.	№ докцм.	Підпис	Дата		

4. Якість повітря (рис. 3.8) – інтегрує дані сенсора ENS160 та AGS02MA. Відображає індекс якості повітря та концентрацію летких органічних сполук. Статуси змінюються залежно від величини показників: «Добре», «Середньо», «Погано» або «Критично».

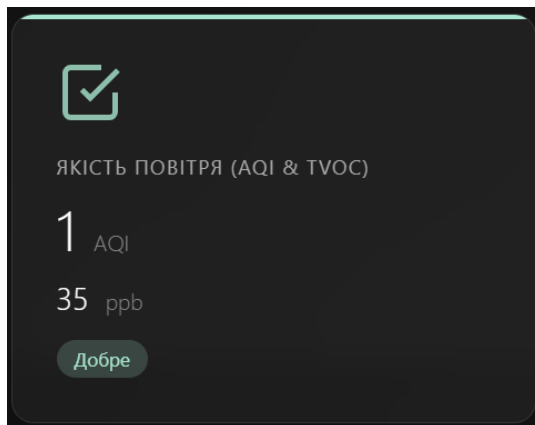


Рисунок 3.8 – Вигляд картки якості повітря

5. Концентрація CO₂ (рис. 3.9) – вимірює концентрацію вуглекислого газу. Статуси відображають безпеку середовища: «Норма», «Погано» та «Небезпечно».

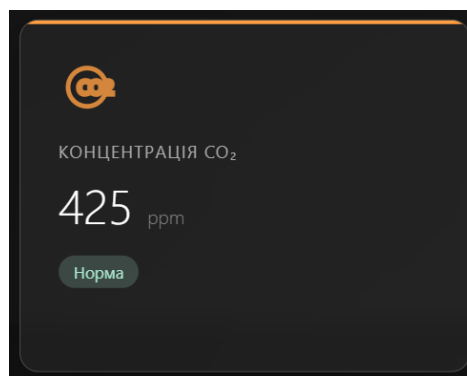


Рисунок 3.9 – Вигляд картки концентрації CO₂

6. Рівень шуму (рис. 3.10) – відображає середній рівень звуку у децибелах та класифікує його як «Тихо», «Помірно» або «Гучно».

					КРМ.АКСМ-20.00.000 ПЗ	Арк.
						59
Змн.	Арк.	№ докцм.	Підпис	Дата		

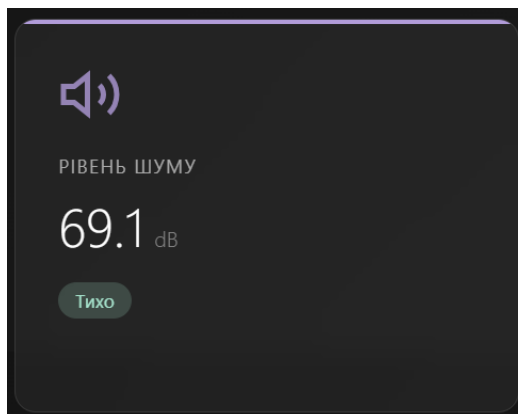


Рисунок 3.10 – Вигляд картки рівня шуму

Кожна картка містить SVG-іконку для швидкого візуального розпізнавання типу показника, числове значення з одиницею виміру та статус, який динамічно змінюється залежно від порогових значень сенсорів.

Динамічне оновлення даних відбувається за допомогою JavaScript для періодичного отримання даних з мікроконтролера. Кожні 2 секунди виконується запит до адреси /data, що повертає JSON з актуальними показниками сенсорів. Після отримання даних відбувається:

- оновлення числових значень усіх карток у реальному часі;
- динамічна зміна класів статусів карток, що змінює кольорове виділення: зелений (норма), жовтий (попередження), червоний (критично);
- оновлення часу останнього зчитування даних, що дозволяє користувачу бачити актуальність відображуваної інформації.

Цей підхід дозволяє реалізувати принцип «реального часу» без необхідності перезавантаження сторінки, що особливо важливо для моніторингу середовища, де швидкі зміни можуть мати критичне значення.

До переваг вебінтерфейсу можна віднести наступне:

- інтуїтивно зрозумілий інтерфейс із наочною візуалізацією даних;
- можливість моніторингу у реальному часі без необхідності перезавантаження сторінки;
- динамічне відображення статусів параметрів за допомогою кольорового виділення;

					<i>КРМ.АКСМ-20.00.000 ПЗ</i>	Арк.
						60
Змн.	Арк.	№ докцм.	Підпис	Дата		

- адаптивний дизайн для використання на різних типах пристроїв – ПК, планшети та смартфони;
- віддалений доступ через Wi-Fi, що забезпечує мобільність і гнучкість моніторингу.

Вебінтерфейс є кінцевим елементом системи моніторингу, який отримує дані з усіх сенсорів через ESP32. Основні етапи роботи та пояснення наведено в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Основні етапи роботи

№	Етап	Пояснення
1	Збір даних сенсорів	Мікроконтролер з певною частотою зчитує показники від сенсорів
2	Обробка даних	Значення сенсорів фільтруються та згладжуються за допомогою експоненційного фільтра для усунення різких коливань та забезпечення стабільного відображення
3	Вивід на локальний дисплей	Паралельно дані виводяться на TFT-дисплей, що дозволяє здійснювати локальний моніторинг
4	Вебсервер	ESP32 приймає HTTP-запити від браузера. У разі запиту /data відправляються актуальні дані у форматі JSON, а у разі запиту на основну сторінку – HTML-код інтерфейсу зі стилями та JavaScript
5	Відображення на вебінтерфейсі	Дані, отримані у JSON, відображаються у вигляді карток з числовими значеннями та кольоровими статусами. Статус кожного параметра визначається порівнянням значень з встановленими порогами

3.2.1 Опис основних функцій

Функція `readAGS02MA` реалізує низькорівневий обмін даними по шині I²C з газовим сенсором, що використовується для оцінювання загальної якості повітря. Сенсор повертає цифрове представлення концентрації летких органічних речовин, яке функція переводить у формат $\text{см}^3/\text{м}^3$.

Алгоритм роботи:

1. Формується I²C-передача до пристрою за адресою 0x1A, що відповідає AGS02MA.
2. Надсилається команда 0x00 для ініціювання процедури вимірювання.
3. Здійснюється затримка, необхідна для завершення конверсії.
4. Запитується два байти даних, які сенсор генерує як 16-бітне значення.

5. Отримані байти об'єднуються в одне 16-бітне число за допомогою операцій зсуву та логічного OR.

6. Результат масштабується згідно з документацією виробника, отримуючи значення у $\text{см}^3/\text{м}^3$.

7. У випадку недостатньої кількості байтів повертається значення -1 , що слугує індикатором помилки зчитування.

Повертає числове значення концентрації VOC у $\text{см}^3/\text{м}^3$, яке може бути використане для оцінювання загального стану якості повітря або для композитних індексів.

Функція `updateSensors` виконує централізоване опитування сенсорів мікроклімату та оновлює глобальні змінні, що зберігають поточний стан середовища. Вона об'єднує роботу різних типів сенсорів: температурно-вологісних, газоаналізаторів, оптичних датчиків та мікрофонних модулів.

Функція `updateTFT` відповідає за візуалізацію виміряних параметрів на TFT-дисплеї Adafruit ST7789, що виконує роль локального інтерфейсу користувача.

Опис роботи:

1. Очищається екран та встановлюються параметри відображення.
2. Кожен індикатор виводиться у власному кольорі для поліпшення сприйняття інформації.
3. Текст формується за допомогою функцій форматowanego виведення.
4. Екран оновлюється повністю раз на секунду, синхронізовано з оновленням сенсорних даних.

Функція `handleClient` реалізує повноцінний HTTP-обробник для вебсерверу. Забезпечує дві ключові функції: динамічне формування HTML-вебсторінки та надання JSON-даних для автоматизованого оновлення інтерфейсу.

Функція читає заголовки, поки не буде виявлено порожній рядок — умовний роздільник між заголовками та тілом запиту. Паралельно перевіряється, чи містить рядок запиту шлях `GET /data`.

					<i>KPM.AKCM-20.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докцм.	Підпис	Дата		62

Режим 1: повернення JSON-даних: якщо запит є /data, клієнту надсилається структурована JSON-відповідь:

```
{"temperature":..., "humidity":..., "aqi":..., "tvoc":..., ...}
```

Ці дані використовуються JavaScript-кодом фронтенду для оновлення індикаторів кожні 2 секунди.

Режим 2: повернення HTML-сторінки: якщо /data не запитано, формується повноцінна HTML-сторінка з адаптивним дизайном; CSS-оформленням (градієнти, прозорі блоки, анімації); SVG-іконками параметрів; програмною логікою для динамічного оновлення статусів (норма/попередження/критично); JavaScript-функцією `updateData()`, що викликає /data.

Функція забезпечує інтерактивний вебінтерфейс у режимі реального часу без потреби перезавантаження сторінки.

Функція `setup` виконує початкову конфігурацію всієї системи: апаратних модулів, бібліотек, сенсорів, TFT-дисплея та Wi-Fi.

Основні етапи наведено нижче:

1. Ініціалізація серійного порту для діагностики.
2. Запуск шини I²C для ENS160 і AGS02MA.
3. Ініціалізація DHT11.
4. Перевірка працездатності ENS160 та переведення датчика в стандартний режим.
5. Конфігурація TFT-дисплея та виведення заставки.
6. Створення Wi-Fi точки доступу ESP32 у режимі Access Point.
7. Запуск HTTP-сервера на порту 80.

Функція забезпечує коректне вмикання всіх системних компонентів і підготовку до роботи основного циклу.

Функція `loop` реалізує нескінченний робочий цикл програми, виконуючи періодичне опитування сенсорів, оновлення екрана та обробку мережевих запитів.

Алгоритм роботи:

					КРМ.АКСМ-20.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докцм.	Підпис	Дата		63

1. Визначається поточний час за `millis()`.
2. Якщо пройшла 1 секунда — викликаються: `updateSensors()` та `updateTFT()`.
3. Перевіряється, чи підключився новий клієнт до вебсервера.
4. Якщо клієнт активний, обробка передається у `handleClient()`.

Забезпечує безперервний цикл функціонування системи моніторингу, синхронізуючи всі підсистеми.

3.3 Експериментальні дослідження та тестування системи

Експериментальне тестування розробленої системи моніторингу мікроклімату проводилося з метою перевірки її працездатності, надійності та точності вимірювання основних параметрів внутрішнього середовища в умовах реальної експлуатації захисних укриттів. Особлива увага приділялася оцінюванню можливості використання системи для оперативного контролю стану повітря в умовах обмеженої вентиляції та підвищеного антропогенного навантаження, що є характерним для укриттів цивільного захисту.

Основними завданнями експериментальних досліджень були:

- перевірка стабільності роботи системи протягом тривалого часу;
- оцінювання точності показів сенсорів температури, вологості, якості повітря, концентрації CO₂, освітленості та рівня шуму;
- аналіз впливу різних умов експлуатації укриттів на параметри мікроклімату;
- визначення можливостей практичного застосування системи для підвищення рівня безпеки перебування людей в укриттях.

Тестування проводилося у трьох захисних укриттях міста Івано-Франківськ, які відрізнялися за функціональним призначенням, площею та експлуатаційними умовами (рис. 3.11):

					<i>КРМ.АКСМ-20.00.000 ПЗ</i>	Арк.
						64
Змн.	Арк.	№ докцм.	Підпис	Дата		

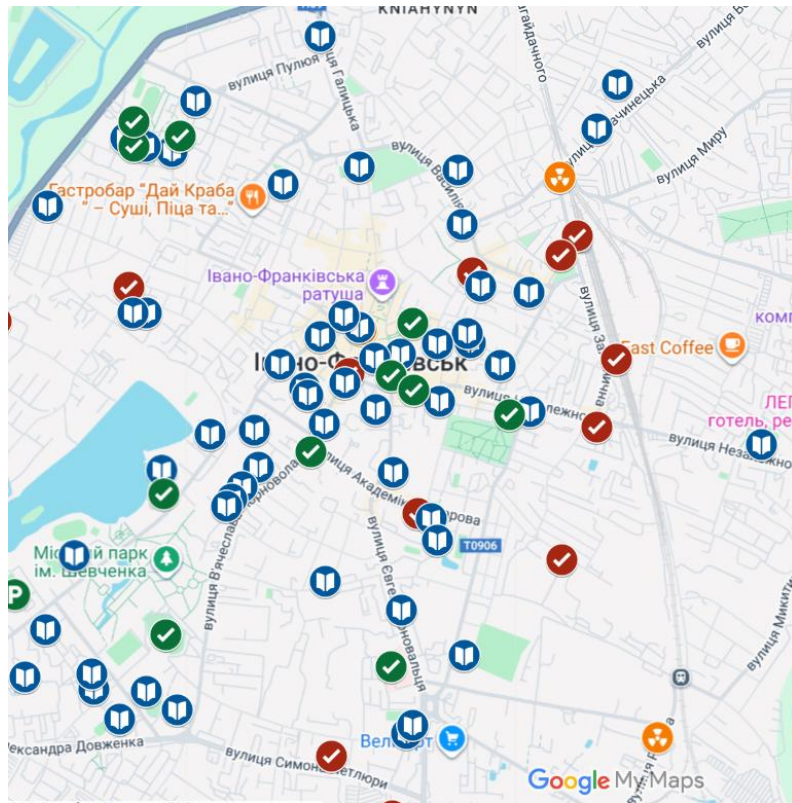


Рисунок 3.11 – Мапа укриттів м. Івано-Франківськ

1. Укриття №1 (житлове, вул. Є. Коновальця, 138А) – підвальне приміщення житлового будинку, розраховане на перебування до 40 осіб, з мінімальною природною вентиляцією.
2. Укриття №2 (громадське, вул. Української Перемоги, 32) – укриття загального користування з підвищеною щільністю людей, обмеженим повітрообміном та значним антропогенним навантаженням.
3. Укриття ІФНТУНГ (вул. Карпатська, 15) – укриття, розташоване на території Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу, обладнане системою вентиляції та освітленням, що відповідає нормативним вимогам.

У кожному з укриттів система моніторингу встановлювалася у центральній частині приміщення на висоті приблизно 1,5 м від рівня підлоги, що забезпечувало репрезентативність вимірювань та відповідало рекомендаціям щодо оцінювання параметрів мікроклімату у приміщеннях з постійним перебуванням людей.

Для оцінювання достовірності даних, отриманих розробленою системою, вимірювання проводилися паралельно з використанням сертифікованих еталонних приладів. До складу еталонних засобів вимірювання входили:

- цифровий термогігрометр для визначення температури та відносної вологості повітря;
- портативний газоаналізатор для вимірювання концентрації CO₂;
- прилад для оцінювання вмісту летких органічних сполук;
- люксометр для вимірювання освітленості;
- шумомір класу точності 2 для визначення рівня звукового тиску.

Вимірювання проводилися протягом 30–40 хвилин у кожному укритті. Дані з сенсорів системи оновлювалися з інтервалом 1 секунда, після чого виконувалося усереднення показів для зменшення впливу випадкових шумів та короткочасних коливань.

Результати експериментальних досліджень наведено у таблиці 3.2, де для кожного параметра подано усереднені значення, отримані розробленою системою та еталонними приладами.

Таблиця 3.2 – Порівняння результатів вимірювань

Параметр	Укриття №1	Укриття №2	Укриття ІФНТУНГ
Температура, °C	18,5 / 17,6	19,5 / 19,9	20,3 / 20,6
Вологість, %	75 / 77	65 / 67	54 / 55
CO ₂ , см ³ /м ³	980 / 1020	1620 / 1700	290 / 920
TVOC, мм ³ /м ³	210 / 225	380 / 400	190 / 200
AQI	2 / 2	4 / 4	2 / 2
Освітленість, %	42 / 45	28 / 30	55 / 58
Рівень шуму, dB	48 / 50	62 / 65	45 / 47

Аналіз наведених даних свідчить, що розроблена система моніторингу забезпечує достатню точність вимірювання всіх контрольованих параметрів. Відхилення показів температури не перевищувало ±0,4 °C, що є прийнятним для сенсорів типу DHT11. Для відносної вологості максимальна похибка

					КРМ.АКСМ-20.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докцм.	Підпис	Дата		66

становила до ± 3 %, що не перевищує допустимі значення для задач моніторингу мікроклімату.

Особливо показовими є результати вимірювання концентрації CO₂ та показників якості повітря. В укритті №2 зафіксовано значне перевищення концентрації CO₂, що безпосередньо пов'язано з великою кількістю людей та недостатньою вентиляцією. При цьому система коректно відобразила погіршення якості повітря, що підтверджується значенням індексу AQI = 4.

Результати вимірювання освітленості та рівня шуму також демонструють незначні відхилення від еталонних значень. Застосування експоненційного згладжування дозволило зменшити вплив імпульсних завад та підвищити стабільність показів, що є важливим для умов укриттів.

Проведені експериментальні дослідження підтвердили, що розроблена система моніторингу:

- забезпечує безперервний контроль параметрів мікроклімату;
- дозволяє оперативно виявляти потенційно небезпечні умови перебування людей;
- є придатною для використання в укриттях різного типу та призначення;
- може бути інтегрована у ширші системи управління безпекою.

Таким чином, результати тестування підтверджують доцільність використання запропонованої системи як інструменту підвищення рівня безпеки та комфорту перебування людей в захисних укриттях.

Висновки до розділу

У даному розділі виконано практичну реалізацію автоматизованої системи моніторингу мікрокліматичних параметрів, що підтверджує можливість застосування розроблених у попередніх розділах концептуальних і структурних рішень. Створено завершений апаратний прототип системи на базі мікроконтролера ESP32 із модульною архітектурою, що забезпечує вимірювання температури, відносної вологості, концентрації CO₂, летких органічних сполук, індексу якості повітря, рівня освітленості та звукового

					<i>КРМ.АКСМ-20.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докцм.	Підпис	Дата		67

тиску. Запропонована конструкція характеризується компактністю, зручністю обслуговування та можливістю подальшої модернізації.

Реалізовано локальну систему відображення інформації на кольоровому TFT-дисплеї, що дозволяє оперативно оцінювати стан мікроклімату без використання зовнішніх пристроїв. Розроблений вебінтерфейс на базі вбудованого вебсервера ESP32 забезпечує віддалений доступ до даних у режимі реального часу через Wi-Fi та відзначається інтуїтивно зрозумілою структурою, адаптивним дизайном і наочною візуалізацією параметрів із динамічним відображенням їхнього стану.

У ході програмної реалізації опрацьовано алгоритми опитування сенсорів, фільтрації та згладжування даних, формування JSON-повідомлень і обробки HTTP-запитів. Чіткий розподіл функціональних обов'язків між програмними модулями забезпечує стабільну роботу системи та синхронізацію всіх підсистем у режимі реального часу. Загалом результати реалізації підтверджують працездатність і ефективність розробленої системи та доцільність її використання для моніторингу мікрокліматичних умов у захисних спорудах цивільного захисту.

Проведено експериментальне тестування розробленої системи моніторингу мікроклімату в реальних умовах експлуатації захисних укриттів міста Івано-Франківськ, у тому числі на базі ІФНТУНГ. За результатами порівняльного аналізу з еталонними вимірювальними приладами встановлено, що система забезпечує достатню точність, стабільність та надійність вимірювання основних параметрів внутрішнього середовища. Отримані результати підтвердили здатність системи своєчасно виявляти погіршення якості повітря.

					<i>КРМ.АКСМ-20.00.000 ПЗ</i>	Арк.
						68
Змн.	Арк.	№ докцм.	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ

Кваліфікаційна робота виконана у відповідності з основною темою «Розробка автоматизованої системи моніторингу мікроклімату в захисних спорудах цивільного захисту».

У магістерській роботі розв'язано актуальну науково-прикладну задачу розробки автоматизованої системи моніторингу мікроклімату в захисних спорудах цивільного захисту з використанням сучасних мікроконтролерних і сенсорних технологій.

У ході виконання роботи проведено ґрунтовний аналіз нормативно-правової бази, наукових публікацій та існуючих технічних рішень у сфері моніторингу мікроклімату. Встановлено, що більшість наявних укриттів не оснащені автоматизованими засобами контролю температури, вологості та якості повітря, а наявні промислові рішення недостатньо адаптовані до специфічних умов експлуатації захисних споруд цивільного захисту. Це підтвердило доцільність розробки спеціалізованої системи, орієнтованої на автономну роботу, енергоефективність та простоту впровадження.

На основі сформульованих вимог було спроектовано апаратно-програмну архітектуру системи моніторингу, центральним елементом якої є мікроконтролер ESP32. Запропонована багаторівнева структура забезпечує інтеграцію мультисенсорної платформи, локальної візуалізації даних та вебінтерфейсу віддаленого доступу через бездротове з'єднання. Обґрунтовано вибір сенсорних модулів для вимірювання температури, вологості, концентрації CO₂, летких органічних сполук, індексу якості повітря, освітленості та рівня шуму, а також середовища розробки Arduino IDE для реалізації вбудованого програмного забезпечення.

У межах роботи реалізовано завершений апаратний прототип системи та розроблено програмне забезпечення, яке забезпечує опитування сенсорів, фільтрацію та згладжування вимірювань, формування структурованих даних і їх відображення у режимі реального часу. Реалізація локального TFT-дисплея та

					<i>КРМ.АКСМ-20.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докцм.	Підпис	Дата		69

вбудованого вебінтерфейсу дозволяє здійснювати оперативний контроль параметрів мікроклімату без використання зовнішніх мережевих ресурсів.

Проведене експериментальне тестування системи в реальних умовах експлуатації захисних укриттів міста Івано-Франківськ, підтвердило її працездатність, стабільність та достатню точність вимірювань. Порівняльний аналіз з еталонними вимірювальними приладами показав, що похибки вимірювання не перевищують допустимих значень для сенсорів відповідного класу. Система продемонструвала здатність своєчасно виявляти погіршення якості повітря, зокрема підвищення концентрації CO₂, що є критично важливим для забезпечення безпеки перебування людей в укриттях.

Отримані результати свідчать про практичну придатність розробленої автоматизованої системи моніторингу мікроклімату та доцільність її використання як елемента систем цивільного захисту. Запропоновані технічні та програмні рішення можуть бути використані для подальшого розвитку інтелектуальних систем контролю мікроклімату, інтеграції з вентиляційними установками, системами оповіщення та централізованими інформаційно-аналітичними платформами.

Основні наукові та практичні результати магістерської роботи апробовано на Всеукраїнській науково-практичній конференції молодих учених «ТАК: телекомунікації, автоматизація, комп'ютерно-інтегровані та інформаційні технології». Матеріали доповіді опубліковано у збірнику праць конференції за темою: «Approximate Methods for Solving Optimal Control Problems in Microclimate Monitoring Systems of Civil Defence Shelters». Крім того, результати дослідження за темою «Розробка автоматизованої системи моніторингу мікроклімату в захисних спорудах цивільного захисту» представлені у щорічному каталозі «Інтелектуальний продукт вчених, винахідників і раціоналізаторів Прикарпаття» (16-е видання, Івано-Франківськ, 2025).

					<i>КРМ.АКСМ-20.00.000 ПЗ</i>	Арк.
						70
Змн.	Арк.	№ докцм.	Підпис	Дата		

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ДБН В.2.2-5:2023 Захисні споруди цивільної оборони. Будинки і споруди [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://dbn.co.ua/load/normativy/dbn/1-1-0-390>.

2. Панкевич В.В., Гуменчук А.Є., Томчук М.А.,. Аналіз міжнародних практик облаштування сховищ та укриттів. Панкевич В. В. Гуменчук А.Є. Аналіз міжнародних практик облаштування сховищ та укриттів / В. В. Панкевич, А.Є. Гуменчук, Томчук Є.А, // Матеріали міжнародної науково-практичної інтернет-конференції «Молодь в науці: дослідження, проблеми, перспективи (МН-2025)» [Електронне мережне наукове видання] : збірник матеріалів. – Вінниця: ВНТУ, 2025. Режим доступу: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/mn/mn2025/paper/view/22793>.

3. Хімичева Г., Дзюба О. ВИБІР ТА ОБҐРУНТУВАННЯ МЕХАНІЗМІВ ТА ІНСТРУМЕНТІВ ПОБУДОВИ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ МІКРОКЛІМАТУ УКРИТТІВ. Scientific review. 2023. Т. 3, № 88. С. 19. URL: [https://doi.org/10.26886/2311-4517.3\(88\)2023.2](https://doi.org/10.26886/2311-4517.3(88)2023.2).

4. ISO 7730:2005 (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. 11.2005, 52.

5. Khera, N., & Balgavhar, S. (2012). *Design of Microcontroller based Wireless SCADA System for Real Time Data*. 106–108. https://doi.org/10.3850/978-981-07-1403-1_263.

6. Avhad, M., Divekar, V., Golatkar, H., & Joshi, S. (2013). Microcontroller based automation system using industry standard SCADA. *IEEE India Conference*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/INDCON.2013.6726082>.

7. Kamble, P. P. (2023). Low Cost Scada System for Micro Industry. *International Journal For Science Technology And Engineering*, 11(5), 2648–2650. <https://doi.org/10.22214/ijraset.2023.52153>.

					КРМ.АКСМ-20.00.000 ПЗ	Арк.
						71
Змн.	Арк.	№ докцм.	Підпис	Дата		

8. Бугаєва Л. М. Інтелектуальний аналіз як необхідний інструмент для ефективного використання баз даних систем SCADA / Л. М. Бугаєва, Ю. О. Безносик, І. А. Сидоренко // Topical issues of the development of modern science: Abstracts of III Intern. Sci. and Practical Conf. Софія, Болгарія. – 2019. – С. 422–426.

9. Міркевич Р. М. Розробка програмного каркасу для контролерів базової системи керування процесом з урахуванням вимог до інтегрування з іншими підсистемами і реалізації сервісних функцій діагностики та обслуговування / Р. М. Міркевич, В. А. Путятіна // Перша Міжнародна конференція «Проблеми виведення з експлуатації об'єктів ядерної енергетики та відновлення оточуючого середовища». – Славутич, 2016. – С. 161–165.

10. Катаєва Є. Ю. АСУ ТП SCADA-System в застосуванні інтелектуалізації проектування технологічного процесу / Є. Ю. Катаєва, А. В. Павлов // Молодий вчений. – 2017. – № 10 (50). – С. 50–54.

11. Пат. на винахід 112127 Україна, МПК (2016.01) F24F 5/00, G05D 23/01 (2006.01), G05D 22/02 (2006.01), G05D 3/12 (2006.01). Спосіб автоматичного регулювання параметрів мікроклімату в приміщенні / Муратов В. Г., Ананський Д. В. ; власник Одес. нац. акад. харч. технологій. – № а2015 01073 ; заявл. 10.02.2015 ; опубл. 25.07.2016, Бюл. № 14.

12. Soetedjo, A.; Hendriarianti, E. Development of an IoT-Based SCADA System for Monitoring of Plant Leaf Temperature and Air and Soil Parameters. Appl. Sci. 2023, 13, 11294. <https://doi.org/10.3390/app132011294>.

13. Automated Shelter Control Systems | Observis Oy. *Observis Oy*. URL: <https://www.observis.fi/shelter-control-systems/> (дата звернення: 02.05.2025).

14. Солоня О.В., Кормановський С. І., Спирін А. В., Рудницький Б.О., Цивільний захист. Практикум. Для студентів всіх спеціальностей за освітньокваліфікаційними рівнями «спеціаліст» та «магістр» денної та заочної форми навчання. – Вінниця: ВНАУ, 2015. – 143 с.

15. ESP-WROOM-32 Datasheet, PDF. *ALLDATASHEET.COM - Electronic Parts Datasheet Search.*

					КРМ.АКСМ-20.00.000 ПЗ	Арк.
						72
Змн.	Арк.	№ докцм.	Підпис	Дата		

URL: https://www.alldatasheet.com/view.jsp?Searchword=Esp-wroom-32%20datasheet&gad_source=1&gad_campaignid=1820008784&gbraid=0AAAAADcdDU_SJ7SycH6UI_drRIHmb7xHy&gclid=Cj0KCQiAxonKBhC1ARIsAIHq_lurJgeuXOIgUN_3p6EF6_v9w5QmdQq4sGDBEfMuuJEYRT4uYNFaFPiAm--EALw_wcB (дата звернення: 15.09.2025).

16. *UAMPER*. URL: <https://uamper.com/products/datasheet/DHT11.pdf> (дата звернення: 17.09.2025).

17. *Sound Sensor - Waveshare Wiki. Waveshare Electronics*. URL: https://www.waveshare.com/wiki/Sound_Sensor (дата звернення: 17.09.2025).

18. *Arduino*. URL: <https://arduino.ua/files/datasheet%20ags02ma.pdf> (дата звернення: 17.10.2025).

19. *GL5516 Datasheet, PDF. ALLDATASHEET.COM - Electronic Parts Datasheet Search*. URL: https://www.alldatasheet.com/view.jsp?Searchword=Gl5516%20datasheet&gad_source=1&gad_campaignid=1437346752&gbraid=0AAAAADcdDU9os37qHdNv2MEGnYVePkEuz&gclid=Cj0KCQiAubrJBhCbARIsAHIdxD_k97rgsS3pkNqY0354U8a4DWtMRknBUHiHrOJBsS8EqYPITb7HEGIaArnAEALw_wcB (дата звернення: 17.10.2025).

20. *ScioSense - Sensing tomorrow's world*. URL: <https://www.sciosense.com/wp-content/uploads/2023/12/ENS160-Datasheet.pdf> (дата звернення: 18.10.2025).

21. *Using the Arduino Software. docs.arduino.cc*. URL: <https://docs.arduino.cc/learn/starting-guide/the-arduino-software-ide/> (дата звернення: 20.10.2025).

22. *Staff L. E. In-depth: Create A Simple ESP32 Web Server In Arduino IDE. Last Minute Engineers*. URL: <https://lastminuteengineers.com/creating-esp32-web-server-arduino-ide/> (дата звернення: 21.10.2025).

					<i>КРМ.АКСМ-20.00.000 ПЗ</i>	Арк.
						73
Змн.	Арк.	№ докцм.	Підпис	Дата		

Додаток А

Кодові вірці функцій

Ініціалізація апаратних модулів (SETUP):

```
void setup() {
  Serial.begin(115200);
  Wire.begin(21, 22);

  dht.begin();

  if (!myENS.begin()) {
    Serial.println("Could not communicate with ENS160!");
    while (1);
  }

  myENS.setOperatingMode(SFE_ENS160_RESET);
  delay(100);
  myENS.setOperatingMode(SFE_ENS160_STANDARD);

  tft.init(240, 320);
  tft.setRotation(1);

  WiFi.softAP(ssid, password);
  server.begin();
}
```

Зчитування газового сенсора AGS02MA:

```
float readAGS02MA() {
  Wire.beginTransmission(AGS02MA_ADDR);
  Wire.write(0x00);
  Wire.endTransmission();
  delay(100);

  Wire.requestFrom(AGS02MA_ADDR, 2);
  if (Wire.available() < 2) return -1;

  uint16_t raw = (Wire.read() << 8) | Wire.read();
  return raw / 10.0;
}
```

Центральна функція збору та фільтрації даних:

```
void updateSensors() {
  humidity = dht.readHumidity();
  temperature = dht.readTemperature();
  agsAirQuality = readAGS02MA();
}
```

```
if (myENS.checkDataStatus()) {
    ensAQI = myENS.getAQI();
    ensTVOC = myENS.getTVOC();
    ensECO2 = myENS.getECO2();
}

int rawLight = analogRead(LIGHT_PIN);
float newLightPercent = (1.0 - rawLight / 4095.0) * 100.0;
smoothLight = alpha * newLightPercent + (1 - alpha) *
smoothLight;
lightPercent = smoothLight;

int rawSound = analogRead(SOUND_PIN);
float newSounddB = 70.0 + 20.0 * log10(rawSound / 2048.0 +
0.0001);
smoothSound = alpha * newSounddB + (1 - alpha) *
smoothSound;
sounddB = smoothSound;
}
```

Візуалізація даних на TFT-дисплеї:

```
void updateTFT() {
    tft.fillScreen(ST77XX_WHITE);
    tft.setTextSize(2);

    tft.setCursor(10, 10);
    tft.printf("TEMP: %.1f C", temperature);

    tft.setCursor(10, 40);
    tft.printf("Hum: %.0f %%", humidity);

    tft.setCursor(10, 100);
    tft.printf("TVOC: %d ppb", ensTVOC);

    tft.setCursor(10, 130);
    tft.printf("CO2: %d ppm", ensECO2);
}
```

Вебсервер та JSON-інтерфейс:

```
client.println("HTTP/1.1 200 OK");
client.println("Content-type: application/json");
client.println();

client.print("{\"temperature\":");
client.print(temperature);
client.print(", \"humidity\":");
client.print(humidity);
client.print(", \"aqi\":");
client.print(ensAQI);
```

```
client.print(",\"eco2\":");  
client.print(ensECO2);  
client.println("}");
```

Головний цикл роботи системи:

```
void loop() {  
  if (millis() - lastSensorTime > 1000) {  
    lastSensorTime = millis();  
    updateSensors();  
    updateTFT();  
  }  
  
  WiFiClient client = server.available();  
  if (client) handleClient(client);  
}
```

БІБЛІОГРАФІЧНА ДОВІДКА

Тема кваліфікаційної роботи: «Розробка автоматизованої системи моніторингу мікроклімату в захисних спорудах цивільного захисту».

Обсяг ПЗ складає 77 аркушів.

Перелік графічних матеріалів:

- КРМ.АКСм-20.00.00.000 С1 – Апаратно-програмна структура системи;
- КРМ.АКСм-20.00.00.000 С2 – Схема периферійних підключень мікроконтролера;
- КРМ.АКСм-20.00.00.000 С3 – Схема роботи SPI ENS160;
- КРМ.АКСм-20.00.00.000 С4 – Схема підключення датчика DHT11;
- КРМ.АКСм-20.00.00.000 С5 – Типова структурна схема контролю параметрів мікроклімату укриттів.

Дата закінчення бакалаврської роботи: 19.12.2025 р.

Студент

Романюк А. М.