

БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА

БР.КІ – 00.00.00.000 ПЗ

Група КІ-22-1

Куцук Євген

2026

Міністерство освіти і науки України
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
Інститут інформаційних технологій
Кафедра комп'ютерних систем і мереж

Куцук Євген Олександрович

УДК 004.4

БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА

Розробка мікроконтролерної системи IoT моніторингу якості повітря приміщень на основі Atmega 328

Комп'ютерна інженерія

(назва освітньої програми)

123 - Комп'ютерна інженерія

(шифр і назва спеціальності)

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

Здобувач освітнього ступеня Куцук Є.О.
(підпис, ініціали та прізвище здобувача)

Науковий керівник доц. Бабчук С.М.
(підпис, прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання керівника)

Допущено до захисту
Завідувач кафедри КСМ

д.т.н., проф. С.І. Мельничук
(посада) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

Івано-Франківськ – 2026 рік

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

(повне найменування вищого навчального закладу)

Інститут *інформаційних технологій*

Кафедра *комп'ютерних систем і мереж*

Освітній ступінь *бакалавр*

Спеціальність 123 – *Комп'ютерна інженерія*

(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри КСМ.

(С.І. Мельничук)

« 25 » 04 2026 року

З А В Д А Н Н Я
НА БАКАЛАВРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Куцук Євген Олександрович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. **Тема проекту (роботи)** Розробка мікроконтролерної системи IoT моніторингу якості повітря приміщень на основі Atmega 328

керівник проекту (роботи) доц. Бабчук С.М.

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

затверджені наказом вищого навчального закладу від від 25.05.2025 №273/7

2. **Строк подання студентом роботи** 11 червня 2026 р.

3. **Вихідні дані до роботи** Матеріали і результати отримані під час проходження переддипломної практики, методичні вказівки, технічна література.

4. **Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)** 1. Аналіз предметної області та вимог до системи

2. Моделювання та вибір методів обробки даних

3. Проектування та реалізація системи

4. Тестування, оцінка ефективності та висновки

5. **Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)**

6. **Консультанти розділів роботи**

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

7. Дата видачі завдання 20 лютого 2026 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1	Постановка задачі та вибір технології для розробки.	Лютий, 2026	
2	Огляд наявних аналогів. Збір інформації про інформаційне та програмне забезпечення.	Березень, 2026	
3	Розробка програмного забезпечення	Квітень, 2026	
4	Тестування програмного забезпечення	Травень, 2026	
5	Оформлення пояснювальної записки	Червень, 2026	

Студент _____
(підпис)

Куцук Є.О.
(прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____
(підпис)

Бабчук С.М.
(прізвище та ініціали)

ЗМІСТ

ВСТУП 6

Розділ 1. АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ ТА ВИМОГ ДО СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ ЯКОСТІ ПОВІТРЯ.....	8
1.1. Основи IoT-систем моніторингу якості повітря в приміщеннях	8
1.2. Огляд існуючих рішень та наукових досліджень	11
1.3. Джерела та показники забруднення повітря в приміщеннях	17
Розділ 2. МЕТОДИ, МОДЕЛІ ТА АПАРАТНО-ПРОГРАМНІ ЗАСОБИ ОБРОБКИ ДАНИХ	21
2.1. Типи датчиків якості повітря та принципи їх роботи	21
2.2. Апаратна платформа та периферійні модулі системи	26
2.3. Методи збору, передачі та обробки даних в IoT-системах	33
Розділ 3. РОЗРОБКА ТА РЕАЛІЗАЦІЯ МІКРОКОНТРОЛЕРНОЇ СИСТЕМИ	37
3.1. Побудова системи моніторингу на базі мікроконтролера ATmega328	37
3.2. Розробка структури та функціональних можливостей системи	44
3.3. Аналіз результатів роботи системи та їх оцінка	57
ВИСНОВКИ	71
СПИСОК ПОСИЛАНЬ НА ДЖЕРЕЛА	73

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Розробка мікроконтролерної системи IoT моніторингу якості повітря приміщень на основі Atmega 328			Літ.	Арк.	Акрушів	
Розроб.		Куцук Є. О.									
Перев.										3	52
Реценз.		Возний І.І.						ІФНТУНГ КІ-22-1			
Н. Контр.		Лазорів А.М.									
Затверд.		Мельничук С.І.									

ВСТУП

У сучасному світі питання якості повітря в приміщеннях набуває особливої актуальності у зв'язку зі зростанням рівня забруднення, урбанізацією та збільшенням часу перебування людей у закритих просторах. Погіршення якості повітря може негативно впливати на здоров'я людини, викликаючи алергічні реакції, захворювання дихальних шляхів та зниження продуктивності. У зв'язку з цим виникає необхідність створення ефективних систем моніторингу, здатних у реальному часі контролювати параметри повітря та оперативно інформувати користувача про їх зміни.

Актуальність теми зумовлена потребою розробки доступних і ефективних рішень для моніторингу якості повітря у приміщеннях із використанням сучасних IoT-технологій та мікроконтролерних платформ. Існуючі системи часто є дорогими або складними у впровадженні, що обмежує їх використання в побутових умовах. Використання мікроконтролера ATmega328 дозволяє створити компактну, енергоефективну та економічно доцільну систему, яка забезпечує збір і обробку даних від датчиків якості повітря.

Метою роботи є розробка мікроконтролерної системи IoT моніторингу якості повітря в приміщеннях на основі ATmega328, яка забезпечує збір, обробку та передачу даних про стан повітря у реальному часі.

Завданнями дослідження є:

- аналіз предметної області та існуючих систем моніторингу якості повітря;
- визначення основних показників та джерел забруднення повітря в приміщеннях;
- дослідження типів датчиків та принципів їх роботи;
- проектування апаратної та програмної структури системи;
- реалізація системи на базі мікроконтролера ATmega328;
- тестування та оцінка ефективності роботи системи.

Об'єктом дослідження є процеси моніторингу якості повітря в приміщеннях із використанням IoT-систем. Предметом дослідження є методи збору, обробки та передачі даних від датчиків якості повітря, а також побудова мікроконтролерної системи на їх основі.

Методи дослідження включають аналіз наукових джерел і існуючих рішень, порівняльний аналіз датчиків і апаратних компонентів, моделювання структури системи, експериментальну реалізацію та тестування, а також аналіз отриманих результатів.

Розроблена система передбачає можливість вимірювання основних параметрів якості повітря, їх обробку та передачу користувачу для подальшого аналізу. Особлива увага приділяється точності вимірювань, енергоефективності та простоті використання системи. Очікується, що впровадження такої системи дозволить підвищити рівень контролю якості повітря, покращити умови перебування у приміщеннях та сприятиме збереженню здоров'я користувачів.

Бакалаврська робота містить 73 сторінки, 30 рисунків, 3 розділи, список використаних джерел із 40 найменувань.

1 АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ ТА ВИМОГ ДО СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ ЯКОСТІ ПОВІТРЯ

1.1 Основи IoT-систем моніторингу якості повітря в приміщеннях

Забруднення повітря зростає зі збільшенням чисельності населення, урбанізацією, розвитком промисловості, транспорту та сільського господарства і є значною проблемою для здоров'я населення у всьому світі. Дихання чистим повітрям є фундаментальним правом кожної людини. Однак, згідно зі звітом, переважна більшість населення світу дихає забрудненим повітрям, і щороку сім мільйонів людей помирають від причин, пов'язаних із забрудненням повітря [1].

Агентство з охорони довкілля США (EPA) регулює як якість зовнішнього повітря, так і якість повітря в приміщеннях (IAQ). Відповідно до даних EPA, рівні забруднювачів у приміщеннях можуть бути в два-п'ять разів вищими, а іноді навіть у понад 100 разів вищими, ніж рівні забруднювачів на відкритому повітрі, що ставить якість повітря в приміщеннях серед п'яти найбільших екологічних ризиків для здоров'я людини.

Якість повітря в приміщеннях (IAQ) є визначальним чинником здоров'я людини. Люди в сучасних суспільствах проводять понад 90 % свого часу вдома, у торговельних центрах, на робочих місцях, у школах, транспорті та громадських приміщеннях [2]. Тому моніторинг якості повітря в приміщеннях у реальному часі є надзвичайно важливим для виявлення небезпечних для здоров'я ситуацій. Якість повітря в приміщеннях особливо критична для людей, які проводять більшу частину життя в закритих приміщеннях, наприклад, для літніх людей, осіб з інвалідністю, немовлят та хронічних хворих. Низька якість повітря становить серйозну загрозу для здоров'я цих категорій населення [3].

Через забруднення повітря в приміщеннях у людей можуть виникати тяжкі проблеми зі здоров'ям, особливо захворювання дихальної, серцево-судинної систем та шкіри. Основними забруднювачами повітря в приміщеннях є діоксид сірки (SO_2), озон (O_3), чадний газ (CO), діоксид вуглецю (CO_2),

діоксид азоту (NO_2), тверді частинки (PM), леткі та напівлеткі органічні сполуки (VOCs), радон та мікроорганізми [4]. Відомо, що певні забруднювачі, зокрема тютюновий дим, CO, NO_2 , формальдегід, азбестові волокна, мікроорганізми та алергени, тісно пов'язані з проблемами здоров'я [5]. Європейське респіраторне товариство (ERS) визначило тверді частинки (PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$ та PM_{10}), леткі органічні сполуки (VOCs) та CO_2 як основні забруднювачі повітря [6].

Для виявлення $\text{PM}_{2.5}$ доступні різні недорогі датчики [7]. Усі ці недорогі датчики працюють за принципом оптичного розсіювання світла. Вони компактні, мають малу масу, енергоефективні та характеризуються високою частотою відбору проб [8]. Джерелами твердих частинок у приміщеннях є прибирання, куріння та приготування їжі. Серед них куріння та приготування їжі є видами діяльності, які найбільше впливають на концентрацію частинок у приміщенні [9]. Зазвичай повідомляється, що однією з найважливіших причин раку легень у домогосподарок є саме приготування їжі. Ці процеси призводять до утворення частинок малого розміру внаслідок згорання.

Польові вимірювання проводилися під час процесу приготування їжі для аналізу концентрації $\text{PM}_{2.5}$. Було розроблено три сценарії залежно від типу вентиляції — природної та механічної. Концентрацію $\text{PM}_{2.5}$ вимірювали протягом 16–30 хвилин приготування їжі. Відповідно до аналізу, концентрація $\text{PM}_{2.5}$ після приготування їжі зросла втричі. Дослідження також показало, що концентрація $\text{PM}_{2.5}$ у вітальні біля кухні була такою ж, як і на кухні [10].

Інше дослідження продемонструвало, що діяльність з куріння та приготування їжі призводить до пікових значень $\text{PM}_{2.5}$ у приміщеннях. Крім того, деякі дослідження показують, що значення PM у приміщеннях значно зростає через проникнення зовнішніх твердих частинок під час природної вентиляції. Одним із методів зменшення кількості твердих частинок у приміщеннях є використання домашніх очищувачів повітря (Home Air Purifiers). Дослідження показало, що використання НАР знижує концентрацію $\text{PM}_{2.5}$ у спальнях у середньому на 45 % протягом 90 хвилин [11].

Діоксид вуглецю (CO_2) суттєво впливає на здоров'я населення і є ключовим індикатором якості повітря в приміщеннях. Система вентиляції, в якій враховується рівень CO_2 , допомагає запобігати багатьом захворюванням, зокрема респіраторним інфекціям. Тому моніторинг рівня концентрації CO_2 у реальному часі є критично важливим для контролю якості повітря в приміщеннях. Рівні CO_2 вище 1000 ppm вказують на потенційну проблему з IAQ [12].

Моніторинг якості повітря в приміщеннях є важливою задачею, яка запускає ланцюг правильних дій — або через зворотний зв'язок у реальному часі, або через пряму активацію автоматичних керуючих пристроїв, що спонукає людей до відповідних дій. Системи моніторингу якості повітря стали indispensable для виявлення високих концентрацій забруднювачів, які можуть виникати в закритих приміщеннях. Основними недоліками традиційних пристроїв для моніторингу якості повітря є труднощі доступу до даних, висока вартість та складність. Упродовж останнього десятиліття технологія недорогих датчиків відіграла важливу роль у значному прогресі моніторингу якості повітря. Недорогі датчики якості повітря можна використовувати для аналізу якості повітря майже в реальному часі та з економічною ефективністю. Зручний інтерфейс користувача та низькі вимоги до обслуговування роблять їх простими у використанні та зручними пристроями [13].

Інтерес до систем вимірювання якості повітря значно зріс останнім часом завдяки виробництву недорогих датчиків. Розроблення пристроїв на основі IoT та недорогих пристроїв для моніторингу IAQ підвищує нашу обізнаність щодо забруднювачів повітря в приміщеннях, які невидимі для ока, але мають негативний вплив на здоров'я. Моніторинг IAQ є необхідним елементом для створення здорового середовища в приміщеннях, що дозволяє людям вживати правильних дій завдяки зворотному зв'язку в реальному часі або прямій активації автоматичних керуючих пристроїв.

Інтернет речей (IoT) являє собою мережу зв'язку, у якій фізичні об'єкти взаємопов'язані між собою або з'єднані з більшими системами [14]. Ця мережа

збирає мільярди даних, отриманих від різних пристроїв, які ми використовуємо в повсякденному житті, і перетворює їх на корисну інформацію.

Багато застосунків було розроблено для розумних будинків, які змінюють наші звички життя за допомогою технології IoT у питаннях комфорту, медичних послуг, безпеки та енергозбереження [15]. У цьому дослідженні пропонується система моніторингу якості повітря для розумних будинків на основі IoT — у реальному часі, недорого, портативна та проста в установці. Запропонована система є рішенням для моніторингу IAQ, яке вимірює температуру та вологість у реальному часі, а також забруднювачі повітря в приміщеннях, такі як PM_1 , $PM_{2.5}$, PM_{10} та CO_2 , і може попереджати користувачів про перевищення концентрацій.

Ця система є повністю бездротовим рішенням, розробленим на базі мікросхеми ESP8266-12E, яка підтримує мережевий протокол IEEE 802.11 b/g/n, розроблений IEEE для бездротових локальних мереж (WLAN).

Для калібрування запропонованої системи вимірювання було використано метод простої лінійної регресії (Simple Linear Regression — SLR). Крім того, для аналізу діяльності мешканців будинку та впливу зовнішніх забруднювачів на якість повітря в приміщеннях були розраховані коефіцієнти кореляції Пірсона (Pearson Correlation Coefficients — PCC). Решта роботи структурована таким чином.

1.2 Огляд існуючих рішень та наукових досліджень

Більшість людей усвідомлює, що забруднення зовнішнього повітря може впливати на їхнє здоров'я, проте забруднення повітря в приміщеннях також може мати значний і шкідливий вплив на здоров'я. Важливо постійно контролювати фактори, що впливають на якість повітря, щоб уникнути ризиків для здоров'я через його погіршення.

Однак на сьогодні більшість розроблених пристроїв для моніторингу даних про якість повітря недостатньо добре відкалібровані. Крім того, вони вимірюють обмежену кількість параметрів якості повітря. Тому для запобігання

можливим ризикам для здоров'я необхідно розробити систему вимірювання та моніторингу, яка ефективно збиратиме та аналізуватиме дані про повітря, яким ми дихаємо. Інтернет є однією з необхідних і важливих технологій, яку можна використовувати для створення системи, здатної моніторити та поширювати інформацію про забруднення довкілля. Зниження вартості апаратного забезпечення та розвиток нових технологій останнім часом дозволили розробити багато високотехнологічних пристроїв для моніторингу стану внутрішнього та зовнішнього середовища з метою підвищення якості життя людини.

Крім того, нові нормативи та граничні значення концентрацій твердих частинок (PM) і газоподібних забруднювачів, встановлені Всесвітньою організацією охорони здоров'я (WHO) та Комітетом ЄС, значно підвищили інтерес людей до цієї проблеми. У дослідженні, проведеному в Китаї, було вивчено взаємозв'язок між концентраціями таких забруднювачів повітря, як PM₁₀, PM_{2.5}, озон, сірка, чадний газ, діоксид вуглецю та діоксид азоту. Було виявлено статистично значущий зв'язок між короточасним впливом високого рівня забруднення повітря та підвищеним ризиком інфікування COVID-19 у 120 містах Китаю.

На сьогодні, завдяки зниженню вартості апаратного забезпечення, практично в кожному домі є принаймні один високотехнологічний пристрій, який сприяє підвищенню якості життя. Загалом, вплив забруднювачів повітря є важливим фактором ризику для здоров'я. Тому рекомендується впроваджувати стійкі політики контролю, такі як регулювання зростання населення, урбанізації та дорожнього руху, щоб уникнути негативних наслідків для здоров'я та економічних збитків від забруднювачів повітря [16].

Традиційні підходи до моніторингу забруднення повітря передбачають використання дорогих, складних і стаціонарних пристроїв, які обмежують доступ до даних, гнучкість застосування та загальний бюджет. Упродовж останнього десятиліття технологія недорогих датчиків зробила значні кроки в моніторингу забруднення повітря, що дає змогу змінити існуючий стан речей.

На відміну від температури, яку люди відчують і можуть зрозуміти, чи є вона комфортною, присутність забруднювачів у повітрі далеко не завжди сприймається людиною. Фактично людина не може відчувати запах CO_2 — одного з найпоширеніших забруднювачів повітря в приміщеннях, який виробляється самою людиною. Якщо житлові приміщення не оснащені відповідними датчиками, концентрація CO_2 може значно перевищувати гранично допустимі значення, і ніхто про це не знатиме [17].

iAir — це система вимірювання на основі IoT, розроблена для моніторингу якості повітря в приміщеннях (IAQ) у реальному часі. Вона складається з датчика ESP8266 як комунікаційного та обчислювального блоку та датчика MICS-6814 — металооксидного напівпровідникового сенсора, який може виявляти різні гази, зокрема чадний газ, діоксид азоту, етанол, метан і пропан, як сенсорного блоку. Система також використовує мобільний додаток для консультації даних та сповіщень у реальному часі.

У дослідженні вивчався вплив різних способів спалювання деревини на концентрацію забруднювачів у приміщеннях, де опалення здійснювалося шляхом спалювання біомаси. Дані щодо CO , CO_2 та PM_{10} , отримані в кімнатах, опалюваних відкритими камінами та дров'яними печами, показали, що ризик розвитку раку в приміщенні з відкритим каміном приблизно в 7 разів вищий, ніж у приміщенні з дров'яною піччю, а значення PM_{10} — приблизно в 25 разів вище.

У роботі запропоновано коротке тематичне дослідження для комплексної програми моніторингу якості повітря в одній зі студентських їдалень, де студенти університету проводять позанавчальний час. Було виявлено, що параметри комфорту та середні значення регульованих забруднювачів загалом перебувають у межах міжнародних норм. Однак значення CO_2 та PM створювали значні коливання залежно від діяльності та рівня заповненості приміщення, причому понад 80 % концентрацій PM утворювалося всередині приміщення.

Люди проводять приблизно 8 годин свого щоденного життя в спальнях.

Тому важливо забезпечити відповідну якість повітря в цих приміщеннях, де людина є особливо вразливою. У спальнях з низькою якістю повітря людям важко заснути, вони не можуть достатньо відпочити під час сну і прокидаються втомленими. У результаті вимірювань IAQ, проведених у спальні одноквартирного будинку, було виявлено, що концентрація CO₂ протягом ночі перевищувала допустимий норматив 1000 ppm [18]. Система моніторингу IAQ на основі IoT, створена з використанням мікроконтролера ESP8266-12E та датчика PMS5003 PM, надає мешканцям будинку можливість втручання для забезпечення комфортного та допоміжного проживання (Ambient and Assisted Living — AAL) [19].

У прототипі, розробленому для моніторингу якості повітря в приміщеннях на основі IoT, як блок обробки даних використовується Arduino UNO, а дані передаються на платформу ThingSpeak у реальному часі. Система сумісна зі смартфонами та забезпечує доступ до даних у реальному часі.

У дослідженні представлено недорогу систему, яка вимірює такі параметри, як CO₂, VOC, атмосферний тиск, вологість і температуру, для вирішення проблем IAQ з використанням архітектури IoT. У запропонованій системі два мікроконтролери Arduino UNO використовуються для збору даних та попередньої обробки. Ці дані передаються на мікроконтролер Raspberry Pi, який є основним блоком, через послідовний зв'язок (serial communication). Зібрані дані доступні через мобільний додаток, розроблений мовою програмування Java з використанням середовища «Android Studio IDE».

У дослідженні запропоновано систему моніторингу IAQ з використанням датчиків MQ135 та MQ7 для вимірювання якості повітря. Система моніторингу IAQ включає Arduino Uno та Wi-Fi-сумісний мікроконтролер ESP8266. Отримані дані зберігаються на платформі ThingSpeak, а сервіс ThingSpeak Cloud використовується для візуалізації даних.

IoT та системи домашньої автоматизації. Кілька наукових публікацій коротко описали величезну сферу IoT, щоб продемонструвати її принципи. Перевагами домашньої автоматизації є зручна інтеграція з мобільними

пристроями, нижча вартість встановлення, стабільність системи, легкість розширення та естетичність використання. Для автоматизації дому нам потрібні такі компоненти, як камери, магнітні дверні датчики та автоматизоване освітлення.

У 2016 році опублікували спеціальний випуск International Journal of Computer Technology and Research (IJCTR) під назвою «Інтернет речей: домашня автоматизація», у якому обговорювалися різні апаратні та програмні додатки й компоненти, такі як RFID та бездротові сенсорні мережі [20]. IoT-технології розумних пристроїв та системи керування використовуються для автоматизації рутинних завдань і діяльності в невеликих сім'ях. Термін «домотика» (domotics) позначає автоматизацію та інтелектуалізацію домашнього середовища.

Автоматизація освітлення, опалення, вентиляції та кондиціонування повітря (HVAC), а також інших побутових приладів і конструкцій може значно покращити якість життя. Хоча концепція автоматизації житла не є новою, досі не запропоновано універсального переможного рішення. Системи домашньої автоматизації пройшли довгий шлях від простих пристроїв, що полегшують працю, до корисних помічників для літніх людей та осіб з інвалідністю у повсякденному житті та користуванні побутовими приладами [21].

Для контролю мобільного телефону або мережевого пристрою можуть застосовуватися методи, що забезпечують віддалений доступ до домашніх механічних систем або системи автоматизації через телефонну лінію, бездротову передачу або Інтернет. Використовуючи технологію Wi-Fi та плату NodeMCU, можна побудувати надійну, недорогу та просту систему для автоматизації функцій будинку. Запропонована конфігурація включає смартфонний додаток на базі Arduino NodeMCU ESP8266, плату, релейний модуль, датчики та камеру спостереження. NodeMCU ESP8266 з'єднує плату Arduino з електронними пристроями в будинку через реле. За допомогою смартфонного додатка мобільні телефони можуть здійснювати послідовний обмін даними з платами NodeMCU та Arduino. Датчики та обладнання можна

керувати дистанційно. Більшість сучасних систем домашньої автоматизації орієнтовані на літніх людей та осіб з інвалідністю, які використовують їх для спостереження за дітьми через камери безпеки або з іншими цілями. Цим пристроєм можна керувати дистанційно з дому, офісу чи будь-якого іншого місця за допомогою мобільного додатка, підключеного до хмари. Таким чином, смартфон може керувати всім обладнанням як безпосередньо з дому, так і через хмару. Голосове керування здійснюється через хмарну систему автоматизації за допомогою Google Assistant.

Система управління енергоспоживанням у домі. Щоб покращити використання IoT, ми повинні розглянути структуру управління IoT у наших будинках і будівлях. Енергоефективні та зручні для користувача системи демонструють кращі результати. Дослідники та студенти регулярно пропонують численні рішення для зменшення втрат електроенергії, проте жодне з них не доведено ефективним без подальшого тестування.

Дослідження «HEMS — House Energy Management System» ілюструє ключові особливості сучасного розумного будинку. Для демонстрації системи управління домашньою автоматизацією використовувалися світлодіодні лампи, камери відеоспостереження, динаміки, інфрачервоні (IR) датчики, ультразвукові (US) датчики, смартфони та пристрої для внутрішнього та зовнішнього мережного з'єднання.

Під час написання дипломної роботи шукалось найбільш ефективну стратегію мінімізації енергоспоживання. Запропоновано просту у використанні та надійну систему домашньої автоматизації на основі мікроконтролера [22]. Для запуску проєкту та отримання кращих результатів необхідна система управління енергоспоживанням у домі, проте потрібні більш точні та умовно-залежні вихідні дані. Наприклад, вартість роботи комп'ютера чи іншого електронного пристрою в пікові години значно вища, ніж в інший час.

Дослідження рекомендувало встановлювати в будинках датчики руху для автоматичного вмикання та вимикання освітлення, а також радило користувачам вручну реагувати після ознайомлення з тарифами на

електроенергію в пікові години. Метою цієї роботи є короткий огляд загальної мети проєкту: зменшення енергетичних втрат завдяки застосуванню більш ефективних автоматизованих рішень. Це призвело до зростання попиту на фахівців, які володіють навичками енергоефективної автоматизації [23].

Система розумної безпеки будинку. Раніше вже було представлено кілька проєктів систем безпеки будинку на базі Інтернету речей. Було розроблено автоматизовану систему оповіщення про дим і пожежу для розумних будинків на основі IoT. Обговорюється багатофункціональна система домашньої автоматизації. Прототип включав автоматичне виявлення газу, систему блокування дверей та розумну систему попередження про дим і пожежу. Прототип було побудовано за допомогою відкритого програмного забезпечення та недорогих компонентів.

У цій роботі використовується система qToggle на базі ESP8285 для з'єднання датчиків з виконавчими механізмами [24]. Мікроконтролерний блок (MCU) має Wi-Fi-з'єднання. Описано плату TI-CC3200 LaunchPad. Вони використали Android-додаток для відстеження умов навколишнього середовища, таких як вологість і рух, у недорогій Wi-Fi-системі автоматизації. Розробили недорогу систему розумного будинку на базі Ethernet, яка здійснює моніторинг енергоспоживання, вторгнень, диму та температури. Хмарні технології, захищений фаєрволем туманний шар і двигун аналізу безпеки разом утворили складну архітектуру розумного будинку.

1.3 Джерела та показники забруднення повітря в приміщеннях

Якість повітря в приміщеннях (IAQ) зазнає впливу різноманітних внутрішніх джерел, а також проникнення забруднювачів зовнішнього повітря. Кожне джерело може впливати на загальну IAQ залежно від його інтенсивності та тривалості дії.

Найпоширенішими забруднювачами повітря в приміщеннях, що виникають від присутності людей, їхньої діяльності та/або матеріалів, є CO₂, CO, леткі органічні сполуки (VOCs) та тверді частинки (PM) різних

аеродинамічних фракцій, зокрема $PM \leq 2,5$ мкм ($PM_{2.5}$) та ≤ 10 мкм (PM_{10}).

Хоча можуть бути й інші забруднювачі, такі як поліциклічні ароматичні вуглеводні (PAHs, зокрема бензо[а]пірен), оксиди азоту ($NO_x = NO + NO_2$), озон (O_3), діоксид сірки (SO_2), формальдегід ($HCHO$), радон та стійкі органічні забруднювачі (POPs), одночасна присутність усіх цих компонентів в одному місці малоімовірна. Крім того, до параметрів, що впливають на комфортність житлового середовища, належать контрольовані параметри теплового комфорту, такі як температура, швидкість руху повітря, відносна вологість (RH), рівень шуму та освітлення. Тому необхідний постійний потік чистого повітря через будівельне середовище для мінімізації ризику накопичення забруднювачів повітря в приміщеннях.

Забруднення повітря є однією з найважливіших екологічних проблем у багатьох країнах, що розвиваються. Щороку забруднення повітря стає причиною значної кількості смертей у світі, переважна більшість яких спричинена захворюваннями дихальної та серцево-судинної систем. У 2013 році було зареєстровано 5,5 мільйона смертей, пов'язаних із забрудненням повітря [25].

Короткочасний вплив підвищених рівнів забруднення повітря пов'язаний зі збільшенням ризику інфаркту міокарда, інсульту та гострої серцевої недостатності [26]. Крім того, виявили, що пренатальний вплив забруднення повітря може порушувати органогенез, що призводить до довгострокових ускладнень. Також вплив забруднення повітря під час вагітності пов'язаний зі зниженою функцією легень у немовлят, збільшенням респіраторних симптомів та розвитком бронхіальної астми в дитячому віці. Шість основних забруднювачів повітря, визначених Агентством з охорони довкілля, включають: чадний газ, тверді частинки, діоксид азоту, діоксид сірки, озон та свинець. Ці забруднювачі мають шкідливий вплив на здоров'я людини та довкілля залежно від їхньої концентрації в атмосфері.

Чадний газ (CO) є одним із найпоширеніших токсичних газів, що сприяють забрудненню атмосфери. CO має значну кореляцію з нещасними

випадками зі смертельним наслідком та смертністю від серцево-судинних захворювань. Крім того, вплив СО пов'язаний із порушенням нейророзвитку [27].

Тверді частинки (РМ) являють собою суміш сажі та інших матеріалів у рідкій і твердій фазі. Утворення сажі відбувається в умовах надлишку палива, високої температури та недостатньої концентрації кисню. Джерелами РМ є як антропогенні, так і природні. До природних джерел належать морська сіль, лісові пожежі, пилок та пліснява. Їх значно важче контролювати порівняно з антропогенними джерелами, які можна регулювати.

Залежно від ефективного аеродинамічного діаметра РМ поділяють на два типи: РМ_{2.5} та РМ₁₀. РМ₁₀ — це тверді частинки з ефективним аеродинамічним діаметром менше 10 мкм. Вони належать до найбільш небезпечних атмосферних забруднювачів, оскільки високі рівні РМ₁₀ корелюють зі зростанням кількості госпіталізацій через респіраторні та серцево-судинні захворювання. РМ_{2.5} — це тверді частинки з аеродинамічним діаметром менше 2,5 мкм. Вони утворюються внаслідок спалювання палива, промислових процесів згоряння та викидів транспортних засобів. РМ_{2.5} має значно сильніший негативний вплив на здоров'я людини, ніж РМ₁₀, оскільки через менший діаметр може проникати глибше в дихальну систему [28].

Індекс якості повітря (AQI). Агентство з охорони довкілля (ЕРА) має на меті «захист здоров'я людини та довкілля». Однією з головних тем екологічних питань, якими воно опікується, є стан повітря — наскільки воно чисте чи забруднене. Для вимірювання якості повітря використовують Індекс якості повітря (AQI) та Індекс стандарту забруднювачів (PSI). Міжнародні установи розглядають шість основних забруднювачів, які поділяються на первинні та вторинні. До первинних належать: діоксид азоту (NO₂), діоксид сірки (SO₂), свинець (Pb), чадний газ (CO) та РМ₁₀. Озон (O₃) є вторинним забруднювачем.

Ці забруднювачі вимірюються та оцінюються відповідно до значень AQI, що дозволяє визначати якість повітря. Індекс AQI може використовуватися для прогнозування якості повітря та встановлення зв'язку

між рівнями забруднення повітря та впливом на здоров'я. Національні стандарти якості навколишнього повітря (NAAQS), надані EPA, які визначають концентрації забруднювачів в атмосфері. Для вимірювання забруднення повітря протягом 24-годинного періоду використовується Стандартний індекс (PSI).

Диференційна оптична абсорбційна спектроскопія. Департамент навколишнього середовища та природних ресурсів — Бюро управління довкіллям (DENR-EMB) використовує систему диференційної оптичної абсорбційної спектроскопії (DOAS) для моніторингу якості повітря в різних регіонах Філіппін. Дані, отримані від систем DOAS, аналізуються та оприлюднюються DENR-EMB на їхньому вебсайті.

У Метро наразі встановлено сім систем DOAS, деякі з яких не здійснюють моніторинг якості повітря у відповідній локації. Хоча дані від DOAS аналізуються DENR, деякі станції дають неточні результати, оскільки вимірюють забруднювачі лише вздовж оптичного шляху. Концентрації забруднювачів визначаються виключно за їхнім поглинанням світла.

2 МЕТОДИ, МОДЕЛІ ТА АПАРАТНО-ПРОГРАМНІ ЗАСОБИ ОБРОБКИ ДАНИХ

2.1 Типи датчиків якості повітря та принципи їх роботи

Оцінка існуючої якості повітря в приміщеннях та несподіваних змін її рівня шляхом безперервних вимірювань необхідна для розуміння стану IAQ та її впливу на здоров'я мешканців. Моніторинг IAQ за допомогою недорогих датчиків (LCS) може слугувати основою розумних будинків і вважатися одним із головних компонентів підтримки високих стандартів якості життя.

Бажані датчики для розумних будинків повинні: (i) бути чутливими та селективними до цільових забруднювачів для надійного виявлення речовин, що становлять ризик для здоров'я мешканців у внутрішньому середовищі; (ii) бути довговічними з оптимальною продуктивністю протягом тривалого періоду розгортання; (iii) мати малі розміри, не потребувати обслуговування та характеризуватися низьким енергоспоживанням; (iv) легко інтегруватися в складні сенсорні мережі; (v) працювати безшумно з мінімальним рівнем шуму під час роботи.

Ці характеристики дозволяють відносно легко розміщувати датчики забруднення повітря в тих місцях, де розуміння рівня якості повітря може мати значний вплив на здоров'я людини. Однак LCS мають певні недоліки, які можуть знижувати довіру користувачів, точність і інтерпретованість зареєстрованих даних. Якщо їхня якість залишатиметься стабільною в реалістичних умовах, вони можуть стати революційним рішенням у різних вимірюваннях IAQ [29].

Електрохімічні датчики. Електрохімічна технологія є однією з найстаріших і, можливо, найпоширеніших технологій для вимірювання концентрацій газоподібних забруднювачів. Вона базується на потенціометричному (вимірювання різниці потенціалів) або амперометричному (вимірювання струму окисно-відновної реакції) принципах.

Принципово електрохімічні датчики (ECs) вимагають щонайменше двох

електродів (опорного та протилежного) для роботи. Вони функціонують на основі хімічної реакції між газоподібним забруднювачем у повітрі та електродом в електроліті. Датчики покриті каталізатором, який забезпечує велику поверхню та сприяє реакціям. Сучасні ЕС містять елемент із трьома електродами: вимірювальним, опорним та протилежним, на яких відбуваються реакції відновлення/окиснення вибраних газів. У цій технології досліджуваний газ дифундує через мембрани датчика до вимірювального електрода, що призводить до переносу електронів (генерування внутрішнього струму).

ЕСs характеризуються порівняно низькою вартістю, високою чутливістю/низькою перехресною чутливістю, низьким порогом виявлення ($\sim$ суб-ppm), прийнятним часом відгуку та низьким енергоспоживанням (мкВт) порівняно з традиційними моніторами [30]. Крім того, для комерційних ЕС повідомлялося про прийнятну стабільність із дрейфом від 2 % до 15 % на рік [40]. Однак вони є складнішими, більш вразливими до отруєння, мають більші розміри, короткий термін служби ($\sim$ 1–3 роки) і вищу вартість порівняно з датчиками на основі металооксидних напівпровідників (МОх).

ЕС демонструють інтерференцію зі зміною метеорологічних умов (наприклад, температури повітря), що є впливом першого порядку на вихідний електричний сигнал концентрації газу (рівень ppb) та впливом другого порядку на чутливість до газу. Низькі температури зменшують швидкість реакції в електрохімічних елементах, що обмежує можливість їх застосування в холодних умовах ($< 10\text{ }^{\circ}\text{C}$). Однак існують рішення для компенсації впливу температури на фонові струми (нульові струми), що дозволяє значно покращити точність вимірювань на низьких рівнях концентрації [31].

Металооксидні напівпровідникові датчики (МОх). У МОх-датчиках газоподібні забруднювачі повітря реагують з поверхнею датчика та змінюють його електричні властивості (опір або провідність). Вимірювання змін електричних властивостей відображає концентрацію цільового забруднювача в повітрі. Завдяки прогресу в методах виготовлення та простоті напівпровідникових сенсорних пристроїв, МОх-датчики мають помірно низьку

вартість порівняно з іншими технологіями (дешевші за ЕС).

МОх-датчики є міцними, легкими, довговічними, чутливими до газів низької концентрації (до рівня ppb) та менш енергоємними (менше 1 Вт), хоча й вищими за фотоіонізаційні детектори. Прості та швидкі процеси виробництва у великих масштабах, а також легко керовані технологічні процеси роблять МОх-датчики бажаною технологією для моніторингу якості повітря.

Повідомлялося, що МОх-датчики чутливі до різноманітних забруднювачів повітря, при цьому їхній відгук змінюється залежно від концентрації газоподібних забруднювачів і робочої температури пристрою [32]. МОх-датчики застосовувалися для вимірювання/моніторингу слідових кількостей газоподібних забруднювачів, таких як CO, CO₂, O₃, загальні VOCs, аміак (NH₃) та NO_x.

Однак у літературі обговорювалися нелінійні вихідні сигнали, перехресна чутливість до інших газів (особливо до змін умов навколишнього середовища та інших речовин VOC у складних сумішах), а також отруєння певними або високими дозами цільових газів (наприклад, високою концентрацією певних органічних сполук і газоподібних сірковмісних речовин).

Фотоіонізаційний детектор (PID) є ще одним типом недорогих датчиків (LCS), який використовує високоенергетичні фотони (ультрафіолетове (UV) випромінювання) для іонізації газоподібних молекул [40]. Основний принцип полягає в тому, що газ між електродами іонізується ультрафіолетовим світлом (з енергетичним рівнем близько 10 eV), утворюючи заряджені іони. Кількість утворених іонів пропорційна вихідному сигналу та концентрації забруднювача в детекторі. Завдяки високій чутливості PIDs широко застосовуються для виявлення летких органічних сполук (VOCs), оскільки кожен компонент VOC має власний потенціал іонізації (IP). Діапазон IP варіюється від легко іонізованих речовин (~7 eV) до надзвичайно важко іонізованих (~12–16 eV).

Наприклад, PIDs ефективно виявляють більшість небезпечних газів, включаючи VOCs (наприклад, бензол = 9,25 eV; гексан = 10,13 eV; толуол =

8,82 eВ; ксилол = 8,56 eВ) завдяки їх низьким потенціалам іонізації. Вони пропонують низку переваг, таких як швидкий відгук, малі розміри, простота використання та обслуговування, а також здатність виявляти низькі концентрації. Однак PIDs не можуть виявляти основні компоненти повітря (O_2 і N_2), CO_2 , CO , SO_2 , CH_4 та O_3 через їх високі потенціали іонізації.

Оптичні датчики, також відомі як датчики розсіювання світла, використовуються для виявлення твердих частинок (PM). Датчики PM, що працюють за принципом розсіювання світла, вимірюють оптичні властивості частинок як ансамблю. Це забезпечує швидкий відгук у реальному часі, мінімальний дрейф і значно знижує вартість та розміри датчиків [33].

Крім малих розмірів, низького енергоспоживання (напруга живлення ~ 5 В) та можливості генерувати високочастотні вихідні дані під час роботи, оптичні датчики є хорошим кандидатом для різних застосувань. Однак значним недоліком датчиків цього типу є варіації у вимірюванні концентрації $PM_{2.5}$ при низьких концентраціях ($20\text{--}30 \text{ мкг/м}^3$) між різними оптичними датчиками PM порівняно з еталонними приладами. Це пояснюється тим, що кількість розсіяного світла залежить від розміру, форми, щільності та показника заломлення частинок. Незважаючи на всі ці обмеження, повідомлялося про надійну роботу оптичних датчиків PM у внутрішніх середовищах з малою просторовою шкалою.

Вибір датчиків. Поєднання кількох датчиків на платах, їх калібрування та перетворення на комерційні продукти для внутрішнього (або зовнішнього) застосування стало поширеною практикою. Такі продукти на основі датчиків стають дедалі доступнішими, хоча інформація щодо терміну служби та обслуговування часто відсутня або недостатньо чітка.

Узагальнюючи специфікації технологій, присутніх на ринку, продуктивність яких була оцінена принаймні в одному дослідженні внутрішнього середовища. Крім того, у таблиці узагальнено специфікації виробників, отримані з технічних паспортів, такі як тип забруднювача, технологія, діапазон вимірювання, заявлений термін служби датчика, механізм

відбору проб, інтервал відбору, діапазон робочих умов навколишнього середовища та можливості підключення.

Дослідження показали, що кореляція датчиків з приладами наукового рівня може змінюватися до і/або після розгортання навіть для ідентичних датчиків в ідентичних умовах. Крім того, вплив умов навколишнього середовища (температури та відносної вологості) та перехресної чутливості до певних забруднювачів (наприклад, вплив NO_2 на датчики O_3 , NO на датчики NO_2 , молекул водню на датчики CO) на показання датчиків недостатньо добре враховано. Інакше кажучи, через відсутність регуляторних органів виникають питання щодо достовірності заявлених значень, відтворюваності та порівнянності результатів. Однак за останні роки в цьому напрямі досягнуто значного прогресу.

Наприклад, були започатковані програми Центру оцінки продуктивності датчиків якості повітря (AQ-SPEC), який діє під егідою Південно-Каліфорнійського округу управління якістю повітря (SCAQMD), Агентства з охорони довкілля США (US EPA) — Air Sensor Toolbox, а також програми Спільного дослідницького центру ЄС (EU JRC) для кількісної оцінки продуктивності, стабільності та забезпечення якості/контролю якості (QA/QC) продуктів на основі датчиків. Для вирішення цих питань більш зручним способом, окрім співрозміщення в польових умовах, нормалізації в польових умовах або польового калібрування за допомогою еталонних приладів, останні дослідження запропонували альтернативне рішення для покращення QA/QC показань.

Доступні лабораторні установки, такі як камера Envilution®, наразі пропонуються академічними та науково-дослідними установами для калібрування та оцінки продуктивності LCS до і після розгортання в контрольованих умовах [34]. Тут контрольоване середовище визначається як ситуація, в якій можна моделювати (контролювати) зміни умов навколишнього середовища та концентрацій забруднювачів, характерних для внутрішніх приміщень, усередині камери. Таким чином, продуктивність LCS можна

оцінювати за комбінацією внутрішніх варіацій параметрів навколишнього середовища та концентрацій забруднювачів.

Співрозміщення в польових умовах може слугувати альтернативним заходом забезпечення якості/контролю якості після розгортання. Крім того, регулярні перевірки калібрування після розгортання для простих мереж, а також застосування розширених статистичних методів (наприклад, перевірка узгодженості даних, кореляції мережі та аналіз головних компонентів) у складних мережах можуть значно підвищити продуктивність системи та забезпечити задовільну роботу протягом тривалого часу.

Такі платформи, ініціативи та програми надають підтримку для отримання надійних даних завдяки використанню відповідних датчиків, що може призвести до покращення оцінки індивідуального впливу забруднення в домашніх умовах.

2.2 Апаратна платформа та периферійні модулі системи

Мікроконтролер — це мініатюрний комп'ютер, який включає центральний процесор (CPU), оперативну пам'ять (RAM), постійну пам'ять (ROM), порти введення/виведення (I/O) та таймер. Він використовується для задач з низьким енергоспоживанням та обмеженим обсягом пам'яті. Пам'ять мікроконтролера заздалегідь зберігає інструкції або програму, тоді як центральний процесор виконує ці інструкції. Крім того, CPU обробляє вхідні дані відповідно до інструкцій і забезпечує виведення даних у різних формах [35].

Arduino Uno — це плата мікроконтролера, побудована на базі ATmega328. Вона містить 14 цифрових портів введення/виведення (I/O), шість з яких можуть використовуватися як виходи широтно-імпульсної модуляції (PWM). Крім того, плата має шість аналогових входів, кварцовий генератор на 16 МГц, USB-підключення, роз'єм живлення та заголовок для In-Circuit Serial

Programming (ICSP). Джерело живлення обирається автоматично — через USB або зовнішнє джерело живлення напругою від 6 В до 20 В.

Мікроконтролер ATmega328 має 32 КБ флеш-пам'яті, з яких 0,5 КБ займає завантажувач (bootloader), 2 КБ — статична оперативна пам'ять (SRAM) та 1 КБ — електрично стиральна програмована постійна пам'ять (EEPROM).



Рисунок 2.1 - Мікроконтролер Arduino Uno

Завдяки своєму компактному розміру та можливості підключення спеціалізованих модулів, таких як Wi-Fi та GPS, Arduino Uno може використовуватися як центральний процесор системи моніторингу якості повітря за вмістом CO₂ та NO₂. Крім того, його можна застосовувати як основний компонент системи моніторингу CO₂ та SO₂ [36].

Центральний процесор (CPU) є частиною мікроконтролера, яка обробляє написаний код (Arduino Classroom, n.d., абз. 3). Це електронна схема в комп'ютері, яка виконує інструкції комп'ютерної програми шляхом здійснення базових арифметичних, логічних, керуючих та операцій введення/виведення (I/O), визначених інструкціями та кодами.

Датчик чадного газу (MQ-7) може виявляти концентрацію CO у діапазоні від 20 до 2000 ppm. Чутливість датчика можна регулювати за допомогою потенціометра. Розміри датчика становлять 40 мм × 20 мм, він

потребує живлення 5 В. Датчик має аналоговий інтерфейс і три виводи: вихід сигналу, живлення та земля. MQ-7 характеризується високою чутливістю до чадного газу та швидкою реакцією.



Рисунок 2.2 - Датчик MQ-7

Система працювала від низьковольтного джерела живлення 5 В, на відміну від інших систем, які потребують 24 В. Датчик міг стабільно працювати протягом мінімум п'яти років за умови правильного калібрування. Для прогнозування концентрації газів не потрібні лабораторні експерименти, а час відгуку становить 20–30 секунд. Було досягнуто високої точності: відхилення для СО при низьких концентраціях становило менше 4 %, для метану — менше 10 %. При вищих концентраціях газів відхилення було більшим [37].

Датчик температури та вологості DHT22. Датчик DHT містить ємнісний сенсор вологості та високоточний пристрій вимірювання температури, підключений до високопродуктивного 8-бітного мікроконтролера. Незважаючи на відносно високу вартість, він має відмінну якість та високу стійкість до перешкод. Датчик використовує стандартний однопровідний інтерфейс, що забезпечує швидку та просту інтеграцію в систему.

Завдяки малим розмірам, низькому енергоспоживанню та можливості передачі сигналу на відстань до 20 метрів, цей датчик є найкращим вибором для широкого кола застосувань. Він призначений для вимірювання температури та вологості навколишнього середовища, характеризується доброю стабільністю та високою надійністю.



Рисунок 2.3 - Модуль температури та вологості DHT22 та з'єднувальні дроти

Датчик DHT22 має розміри 38 мм × 20 мм. Він потребує напруги живлення 5 В і видає вихідну напругу від 0 В до 3,3 В. Датчик може вимірювати температуру в діапазоні від $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+80\text{ }^{\circ}\text{C}$ з похибкою менше $\pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ та відносну вологість від 0 % до 100 % RH з похибкою $\pm 2\text{ \% RH}$ (DHT22 Temperature and humidity module, 2017, абз. 2–5). Реалізовано проект моніторингу температури та вологості, у якому за допомогою датчика DHT22 на базі Arduino Uno перевіряли точність вимірювання температури в дата-центрі. Проект виконано з використанням недорогих компонентів місцевого виробництва, які можна розмістити в невеликому корпусі. Після багаторазового тестування система підтвердила досягнення поставленої мети. Її також можна реалізувати з використанням ESP8266 або інших датчиків. Таким чином, система є гнучкою та масштабовною [38].

Датчик пилу DSM501A використовується для кількісного вимірювання частинок розміром більше 1 мікрона за принципом лічильника частинок. Він здатний виявляти тютюновий дим, пилок та побутовий пил. Датчик є відносно недорогим і компактним для сенсора щільності частинок. Він складається зі світлодіодної лампи, детектора, підсилювача сигналу та нагрівача. Датчик легко інтегрується завдяки виходу PM і може застосовуватися для очищення та очищення повітря. За даними датчик DSM501A може виявляти дрібні частинки розміром від 1 мкм при вимірюванні кількості завислих частинок у приміщенні площею до 30 м³ (с. 1).



Рисунок 2.4 - Датчик пилу DSM501A

У дослідженні було встановлено, що локальна людська активність, оцінена за допомогою відеокамери, співпадає з концентрацією грубих частинок, особливо тих, розмір яких $\geq 2,5$ мкм. Частинки такого розміру можуть виявлятися недорогими датчиками РМ, такими як DSM501A. Додавання додаткових недорогих датчиків дозволяє отримувати більш гладкі дані, зберігаючи при цьому економічність. Розроблене апаратне забезпечення дає змогу передавати дані датчиків РМ у реальному часі на центральний сервер за допомогою бездротових технологій, а також визначати присутність людей, окрім моніторингу якості повітря [39].

Однією з найпомітніших технологічних революцій цього століття, яка отримала визнання, є Інтернет речей (IoT). Незважаючи на те, що технологія лише починає розвиватися, її важливість уже визнана провідними міжнародними організаціями зі стандартизації. Хоча IoT може бути складним, його можна реалізувати за допомогою трьох основних нетривіальних архітектурних компонентів: розумних речей (smart things), серверів backend та інфраструктури зв'язку, як показано на рисунку 2.5. IoT полягає не лише в забезпеченні підключення, а й у масштабному зборі та обміні даними задля досягнення спільної мети.

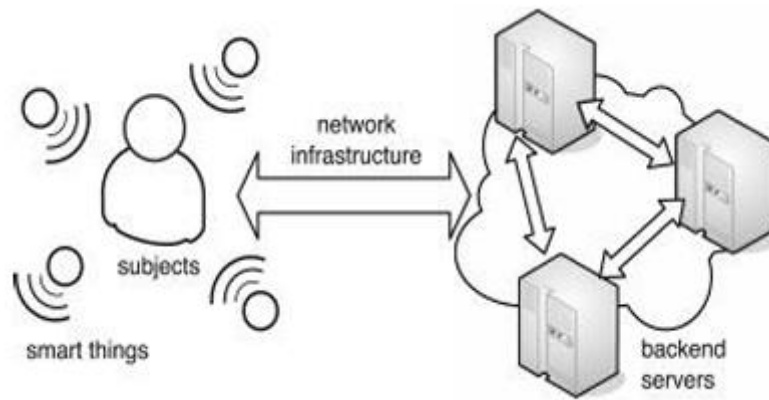


Рисунок 2.5 - Спрощена архітектура IoT

Інтернет речей також можна визначити як мережу невеликих, недорогих, малопотужних, повсюдно присутніх електронних пристроїв, у якій збір даних та обмін інформацією відбуваються без безпосереднього втручання людини. Кожен пристрій функціонує як «розумний вузол» мережі: він збирає інформацію та виконує низькорівневу обробку сигналів для фільтрації шумів і зменшення необхідної пропускної здатності для обміну між вузлами. Вузли повинні безпечно обмінюватися даними з централізованим «хмарним» сервісом для захисту, зберігання та обробки даних, а також передачі корисної інформації людям. IoT — це самоконфігурована та адаптивна система, що складається з мереж датчиків і розумних об'єктів, кінцева мета якої — з'єднати всі речі через Інтернет. Вона поєднала оперативну технологію (OT) та інформаційні технології (IT), дозволивши аналізувати неструктуровані дані, згенеровані машинами, за допомогою спеціальних алгоритмів і змінних [40].

З апаратної точки зору, веб-сервер — це, як правило, комп'ютер, який зберігає всі файли вмісту вебсайту. Цей комп'ютер потім надає ці файли кінцевому користувачеві, який звертається до сайту. Веб-сервер підключений до Інтернету та доступний через нього. З програмної точки зору, він містить кілька компонентів, які керують доступом веб-користувачів до розміщених файлів. Мінімальною вимогою є наявність HTTP-сервера — програмного

забезпечення, яке розуміє URL-адреси та протокол HTTP. URL — це адреса вебсайту або вебсторінки [24].

Хоча на ринку існують комерційні монітори якості повітря, їхня середня вартість становить близько 20 450,00 філіппінських песо. Крім того, вони зазвичай мають великі розміри та не оснащені підключенням до Інтернету.

Acer CloudProfessor є інструментом для поєднання апаратного та програмного забезпечення в рамках IoT, оскільки інтегрує хмарні сервіси, модулі, пристрої та програмні термінали. Завдяки цьому продукту користувачі можуть отримувати доступ до IoT, створеного на основі даних з пристроїв, таких як мобільні телефони або ноутбуки.

Він надає свободу вибору різних мов програмування, включаючи Blockly та JavaScript (Acer CloudProfessor, n.d.). Завдяки принципу «plug, play, code, and make» інновації, створені за допомогою CloudProfessor, легко можуть бути реалізовані студентами.



Рисунок 2.6 - Acer CloudProfessor

Таким чином, для вирішення проблем, спричинених забрудненням повітря, це дослідження спрямоване на розроблення недорогої та портативної системи моніторингу якості повітря, дані якої доступні через Інтернет. Передбачається, що створення такої системи допоможе громадам краще оцінювати якість повітря у своїй місцевості.

2.3 Методи збору, передачі та обробки даних в IoT-системах

Закриті середовища, такі як житлові будинки, накопичують більше забрудненого повітря, ніж відкриті простори, через наявність внутрішніх джерел забруднення, відсутність вільної циркуляції повітря та недостатню вентиляцію. Крім того, навіть в одному й тому ж місці повідомлялося про різні рівні впливу забруднювачів повітря в приміщеннях на окремих осіб [32].

На жаль, використання традиційних пристроїв моніторингу не дозволяє задовільно фіксувати просторові варіації та відображати миттєві зміни IAQ через високу вартість, відсутність масштабовності та неможливість просторово-часового картування забруднювачів повітря в приміщеннях. Зважаючи на ці потенціал і потреби в технологіях, поява недорогих датчиків (LCS) кардинально змінила ландшафт систем моніторингу IAQ. Сьогодні спеціальні датчики та продукти на їхній основі спеціально розробляються та виготовляються для внутрішніх застосувань.

Хоча датчики забруднення повітря мають певні недоліки, відносно менші зміни параметрів навколишнього середовища та менша складність потоків повітря в приміщенні порівняно з зовнішнім середовищем можуть бути перевагою для їх використання всередині приміщень. Узагальнюючи приклади застосування датчиків у внутрішніх середовищах, де порівняно мало уваги приділялося стратегіям просторово-часового розподілу кількох забруднювачів повітря. Завдання розглянутих досліджень обмежувалися оцінкою продуктивності датчиків у закритих середовищах, при цьому моніторинг забруднення повітря поблизу джерел або врахування висоти дихання дорослої людини як загальноприйнятої практики є недостатнім для оцінки загальної IAQ. Зважаючи на планування приміщень і взаємозв'язок між внутрішнім і зовнішнім середовищами [8], у цьому розділі ми зосереджуємося на розробленні відповідних стратегій для внутрішніх середовищ, де датчики забруднення повітря відіграють ключову роль у охопленні території.

Датчики якості повітря слід розгортати систематично по всій території з

метою: (i) оптимізації вартості та кількості датчиків відповідно до планування будівлі, розмірів приміщень і їхніх особливостей; (ii) забезпечення надійності сенсорної мережі у випадку виходу з ладу окремих датчиків; (iii) забезпечення прийняттого просторового та часового охоплення забруднювачів повітря в приміщеннях; (iv) мінімізації витрат на обчислювальний аналіз і прогнознi моделі.

Існують загальні рекомендації щодо стратегій розгортання в практичних інженерних застосуваннях, такі як вибір датчиків відповідно до типових внутрішніх джерел забруднення, врахування впливу зовнішнього забруднення повітря на внутрішнє середовище та розміщення датчиків уздовж стін з забезпеченням зручного доступу для калібрування чи обслуговування [35]. Однак стратегії розгортання датчиків, особливо для застосування в IAQ, зазвичай визначаються на основі цільових функцій і конкретних завдань використання датчиків [14]. Загалом стратегії розгортання у внутрішніх середовищах залежать від часу та простору і можуть бути поділені на дві категорії: (i) інженерні методи та (ii) методи оптимізації.

В інженерних методах використовується попередній досвід і емпіричні правила («rules of thumb»). Рівномірне розміщення кількох датчиків у просторі є поширеною практикою інженерних методів, як видно з досліджень, наведених у таблиці. Однак такий підхід у деяких випадках може призводити до досить дорогих і не завжди здійснених рішень. Застосування цього методу часто призводить до відсутності (i) просторово-часового картування, (ii) контролю часу відгуку та (iii) узагальнення на кілька кімнат/приміщень.

Для компенсації обмежень цього методу останнім часом було розроблено метод оптимізації, у якому при розгортанні датчиків враховуються patterns потоків повітря в приміщенні. У цьому методі використовуються інструменти моделювання, такі як обчислювальна гідродинаміка (CFD), зональна модель та багатозональна модель потоків повітря, у поєднанні з генетичним алгоритмом, штучними нейронними мережами (ANN), методом імітаційного відпалу та стохастичної апроксимації для оптимізації цільової,

вартісної або функції придатності відповідно до заздалегідь визначених цілей.

Хоча цей метод може забезпечити високу точність вибору оптимальної стратегії, методи оптимізації можуть бути обчислювально складними при великомасштабному розгортанні датчиків у багатозональних моделях потоків повітря та CFD-симуляціях. Проте для досягнення оптимальних стратегій незалежно від розташування датчиків і уникнення епізодичних помилок у результатах прогнозування малих сенсорних мереж (комбінація 3–4 датчиків, як зазначено Ren і Cao [79]), можна застосовувати системні методи розгортання датчиків, такі як кластеризаційна модель алгоритму нечітких С-середніх (FCM) на основі ANN або на основі генетичного алгоритму для ефективного прогнозування параметрів внутрішнього середовища.

Хоча стандартних значень для IAQ не існує, а ідея встановлення керівних значень [13] не є новою, ми пропонуємо просту стратегію розгортання LCS у типових внутрішніх приміщеннях на основі доказової бази, зібраної з відповідної опублікованої літератури (рис. 2.7). Ця базова стратегія може розглядатися як узагальнений план у випадках, коли розроблення моделі оптимізації є обчислювально недоцільним. Вона може включати: (i) розгортання датчиків навколишнього середовища та забруднювачів по всьому внутрішньому простору, при цьому висота розміщення має відповідати зросту мешканців; (ii) розміщення датчиків відповідно до рекомендацій, наведених на рис. 2.7, у таких місцях, де відбір проб за допомогою вбудованого вентилятора датчика може представляти весь об'єм середовища.

За відсутності законодавчої бази для регулювання IAQ така стратегія може допомогти оптимізувати відбір проб, що є репрезентативним для внутрішнього середовища, і буде корисною при плануванні відповідних заходів пом'якшення для зменшення впливу забруднювачів повітря в приміщеннях.

Однак оптимальна мережа недорогих датчиків забруднення повітря (LCS) повинна підтримуватися відповідною обробкою даних та прогнозним моделюванням, щоб забезпечити інтерпретацію, візуалізацію та передачу осмислених повідомлень користувачам у простій формі.

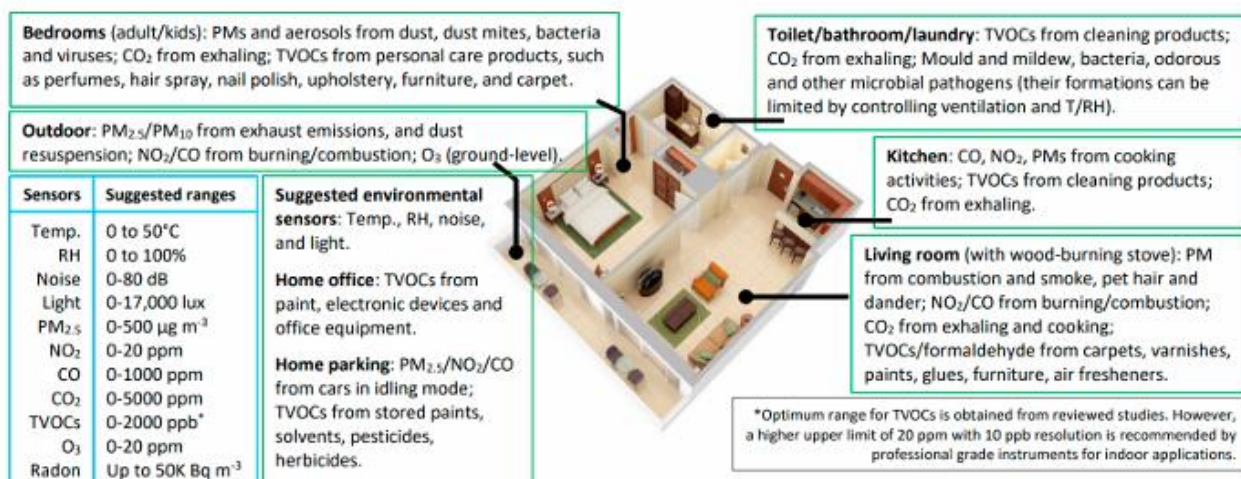


Рисунок 2.7 - Схематична діаграма простої стратегії розгортання LCS

У домашніх умовах відповідно до розташування, включаючи запропоновані датчики навколишнього середовища та забруднення повітря (зелені блоки) та їхні діапазони застосування (синій блок) у типовому внутрішньому просторі. Зображення будинку взято з вільних джерел за допомогою пошукової системи Google Images.

РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА ТА РЕАЛІЗАЦІЯ МІКРОКОНТРОЛЕРНОЇ СИСТЕМИ

3.1 Побудова системи моніторингу на базі мікроконтролера ATmega328

Ідея «домашньої автоматизації» існує вже протягом кількох років. Терміни «розумний будинок» («Smart Home») та «інтелектуальний будинок» («Intelligent Home») з'явилися пізніше і використовувалися для опису концепції мережевого підключення побутових приладів та пристроїв у будинку. Таким чином, концепція розумного будинку привернула увагу дослідників, фахівців із способу життя та споживачів, спрямувавши їх до використання новітніх технологій. Було здійснено значні зусилля щодо розвитку систем дистанційного керування для домашньої автоматизації.

Попередні роботи в цій галузі переважно базувалися на використанні телефонної лінії, наприклад, телефонна система домашньої автоматизації з апаратним бездротовим контролером на базі комп'ютерного підходу. Такі системи, в яких телефон використовується як пристрій введення дистанційного керування, не мають можливості підключення через будь-який користувацький інтерфейс. Також була запроваджена концепція бездротової технології Bluetooth, яка дозволила керувати різними приладами, підключеними через мережу Bluetooth за допомогою мобільного контролера-хоста.

Була запропонована інтернет-орієнтована бездротова система автоматизації будинку для багатофункціональних пристроїв. Хоча система характеризується низькою вартістю та універсальним бездротовим рішенням для домашньої автоматизації, вона все ще має певні обмеження, пов'язані з дальністю бездротового зв'язку та збоями живлення. Також була представлена система домашньої автоматизації на базі програмованого логічного контролера (PLC), яка використовує домашню електричну мережу для зв'язку та інтернет-управління з функцією ведення журналу подій. Незважаючи на те, що цей

метод долає недоліки попередніх методів зв'язку, він все ще потребує вдосконалення.

Була запропонована система на базі GSM-Bluetooth контролера з можливістю дистанційного моніторингу. Також було реалізовано економічно вигідну та гнучку систему автоматизації за допомогою контролера FPGA (Field-Programmable Gate Array) та мережі Bluetooth мобільного телефону. Ця технологія забезпечує паралельну реалізацію апаратних рішень із швидким виконанням алгоритмів. Крім того, була реалізована система автоматизації на базі WiFi, де для дистанційного керування використовувалися мікроконтролер та технологія WiFi.

На основі всіх попередніх розробок у цій роботі пропонується концепція проекту системи автоматизації розумного будинку з використанням мікроконтролера Arduino Uno. Arduino — це відкрита платформа, яка базується на простому у використанні обладнанні та програмному забезпеченні. Плати Arduino здатні зчитувати вхідні сигнали, перетворювати їх на вихідні та активувати мотор, вмикати світлодіод (LED), публікувати дані в інтернет тощо. Плата Arduino має 14 цифрових входів/виходів (з яких 6 виводів можуть використовуватися як ШІМ-виходи), 6 аналогових входів, кварцовий генератор на 16 МГц, USB-роз'єм, роз'єм живлення, заголовок ICSP (In-Circuit Serial Programming) та кнопку скидання. Ця плата містить усе необхідне для роботи мікроконтролера. Її можна підключити до комп'ютера через USB-порт, живити від адаптера змінного струму (AC-to-DC) або використовувати батарею.

На відміну від попередніх плат, Arduino Uno не використовує чіп USB-to-serial драйвера від Future Technology Device International (FTDI). Замість цього в ній застосовується мікроконтролер Atmega8U2, запрограмований як перетворювач USB-to-serial.

Апаратна реалізація в основному включає систему домашньої автоматизації, датчик освітленості на основі LDR для автоматичного вмикання освітлення, а також детектор рівня води.

Основні компоненти, використані в усьому проєкті, наведені нижче:

- Arduino Uno Kit
- Модуль реле
- Фоторезистор (LDR)
- Транзистор BC547
- Світлодіоди (LED)
- Arduino IDE
- Android-додаток (APK)
- Джерело живлення

У цій роботі представлено низьковартісну та гнучку конструкцію системи домашньої автоматизації на основі мобільного телефону. Дизайн базується на автономній платі Arduino Uno, до входів/виходів якої побутові прилади підключені через реле. Зв'язок між мобільним телефоном та платою Arduino здійснюється бездротово через Bluetooth.

Система розроблена як недорога та масштабована, що дозволяє керувати різними типами пристроїв із мінімальними змінами в її базовій структурі.

Простий принципова схема домашньої автоматизації показана на рис. 3.1.

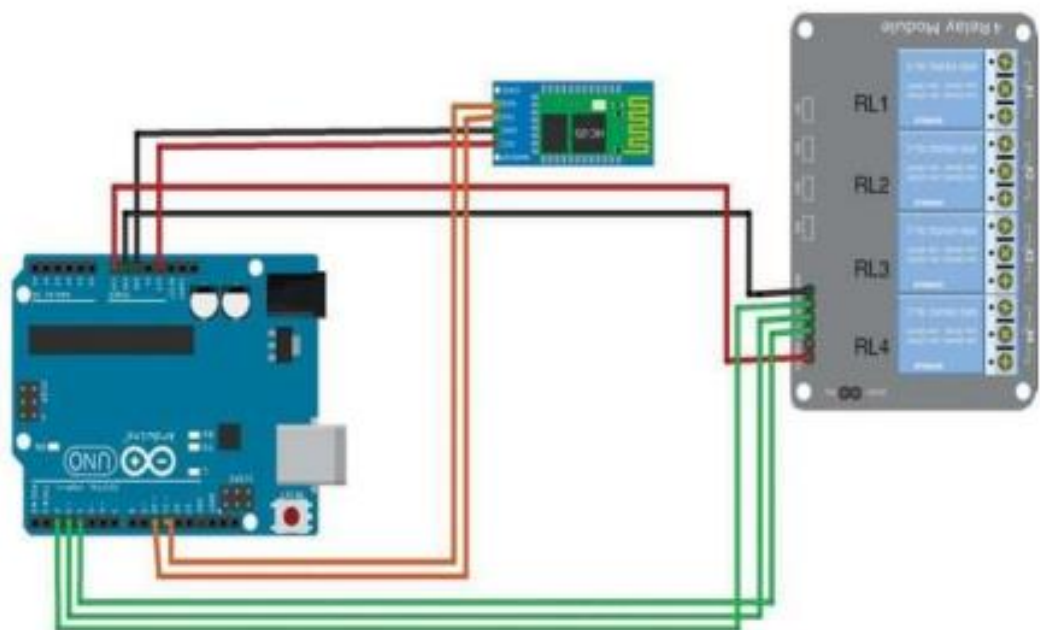


Рисунок 3.1 - Принципова схема домашньої автоматизації.

Принципова схема, показана на рис. 3.1, була реалізована в прототипі будинку (рис. 3.2).

Для автоматизації будинку до Arduino необхідно підключити модуль реле та Bluetooth-модуль HC-05. Як видно з рис. 3.1, входні контакти кожного реле підключені до цифрових виводів Arduino, контакт Vcc (живлення) — до +5 В, а GND (земля) — до GND Arduino. Аналогічно використано чотири контакти Bluetooth-модуля. Передавач (Tx) і приймач (Rx) модуля HC-05 підключені відповідно до Rx і Tx Arduino, а Vcc і Gnd модуля — до +5 В і GND Arduino.

Інша сторона реле підключена до приладів на 220 В таким чином, що нормально замкнутий контакт (NC) залишається вільним, а загальний контакт (COM) і нормально розімкнутий контакт (NO) підключені так, що COM з'єднаний з приладом, а NO — безпосередньо з фазою 220 В. Принцип роботи схеми, показаної на рис. 3.1, полягає в тому, що мікроконтролер отримує сигнал від Android-додатка, і завантажена в нього програма керує станом ON/OFF залежно від отриманого сигналу. Коли Arduino отримує сигнал, реле (електромагнітний ключ) спрацьовує відповідним чином і вмикає або вимикає побутові прилади.

Опис Android-додатка та програми, яка завантажується в Arduino, наведено далі в роботі.

На рис. 3.2 показано повну принципову схему підключення LDR до мікроконтролера. Як видно, один вивід LDR безпосередньо підключений до +5 В Arduino, а інший — через резистор 10 кОм до землі. Цей самий вивід також підключений до аналогового входу Arduino, який передає отриманий сигнал.

Для того, щоб вказати Arduino, які дії виконувати, необхідно завантажити в мікроконтролер програму, написану мовою C/C++. Arduino надає власне інтегроване середовище розробки (IDE), в якому пишеться скетч (sketch), а потім завантажується в мікроконтролер.

Синтаксис дещо схожий на C/C++, але Arduino також містить власні вбудовані функції та класи. На рис. 3.4 наведено базову ініціалізацію. У рядку 14 використовується функція `analogRead` для зчитування рівня освітленості,

отриманого від LDR, у вигляді сигналу напруги. Отримане значення зберігається у змінній `sensorValue`. Потім це значення порівнюється з пороговим рівнем (нижче якого має вмикатися освітлення), і за допомогою функцій `digitalWrite` видаються команди залежно від рівня яскравості світла.

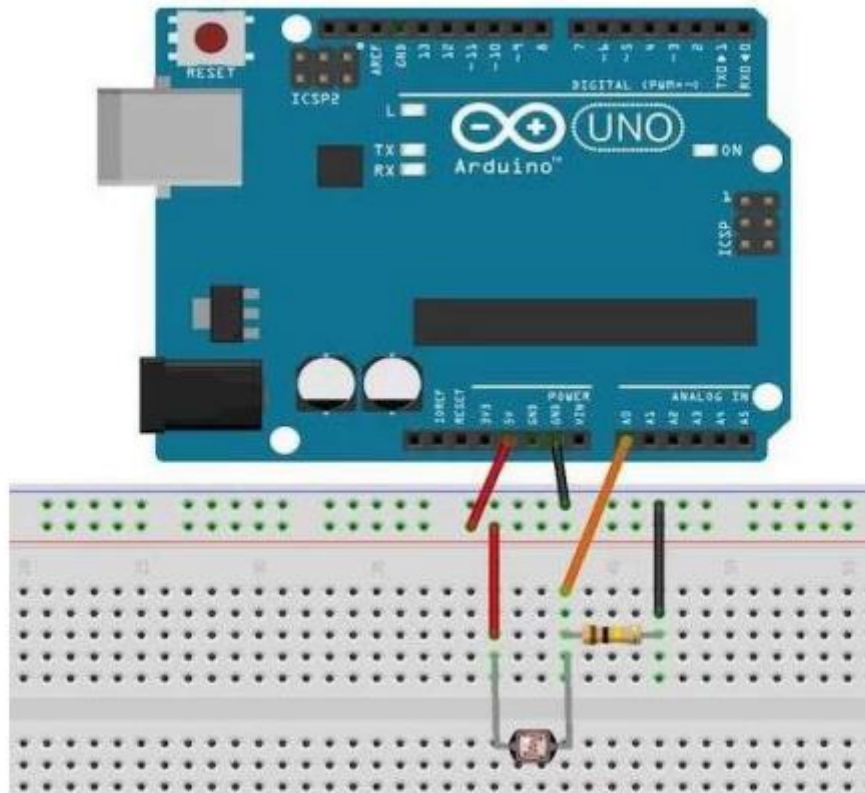


Рисунок 3.2 - Принципова схема підключення LDR до Arduino.

У рядку 22 функція `Serial.available` перевіряє, чи є якісь байти в буфері. Якщо є, то байт зчитується за допомогою `Serial.read` і зберігається у змінній `s`.

У рядку 28 перевіряється, чи є значення у змінній `value`, і це значення виводиться на монітор порту серійного зв'язку Arduino.

На рис. 3.3 показано, що команди ON і OFF надсилаються через Android-додаток. Цей додаток передає команди ON та OFF у вигляді унікальних рядків (strings), які мікроконтролер розпізнає за допомогою коду, наведеного на рис. 3.4. З рядка 31 і далі відбувається порівняння вхідних рядків, після чого Arduino отримує команди через функцію `digitalWrite` для виконання відповідних дій.

```

13 void loop() {
14   int sensorValue = analogRead(sensorPin);
15
16   if (sensorValue<=limit){
17     digitalWrite(ldr,HIGH);
18   }
19   else {
20     digitalWrite(ldr,LOW);
21   }
22   while(Serial.available()){
23     delay(3);
24     char c = Serial.read();
25     value +=c;
26
27   }
28   if(value.length()>0){
29     Serial.println(value);
30   }

```

Рисунок 3.3 - Код базової ініціалізації.

Таким чином, для автоматизації кожного побутового приладу в коді потрібно два блоки IF: один для порівняння рядка команди ON, а інший — для команди OFF. У цьому випадку для ON використовуються символи «1», «2», а для OFF — «А» та «В».

У цій роботі представлено дизайн, концепцію та реалізацію бездротової системи автоматизації розумного будинку на базі мікроконтролера Arduino Uno (ATMEGA328) як центрального контролера.

Розроблена система характеризується низькою вартістю, високим рівнем безпеки, повсюдною доступністю та можливістю автоматичного налаштування порівняно з іншими підходами, описаними раніше в літературі.

```
31 if (value=="1")
32 {
33     digitalWrite (pin1, HIGH) ;
34 }
35 if (value=="A") {
36     digitalWrite (pin1, LOW) ;
37
38 }
39 if (value=="2")
40 {
41     digitalWrite (pin2, HIGH) ;
42 }
43 if (value=="B") {
44     digitalWrite (pin2, LOW) ;
45 }
```

Рисунок 3.4 - Порівняння рядків, надісланих Android-додатком.

Запропонований у роботі підхід дозволяє ефективно керувати побутовими приладами в будинку. Завдяки своїй простоті та нескладній конструкції система може бути легко виготовлена у великих масштабах для масового впровадження.

Ще однією важливою перевагою є те, що програмне забезпечення базується на операційній системі Android, яка на сьогодні має найбільшу кількість користувачів смартфонів у світі.

Крім того, реалізація бездротового підключення Bluetooth разом із мікроконтролером дозволяє встановлювати систему більш простим способом.

Для людей з інвалідністю та літніх людей ця технологія значно спрощує керування побутовими приладами — достатньо просто сидіти на одному місці.

Проте ця технологія не обмежується лише будинками та заводами. Маючи це на увазі, можна автоматизувати практично все, що пов'язане з повсякденним життям.

3.2 Розробка структури та функціональних можливостей системи

На основі аналізу великої кількості нещодавно опублікованих робіт було встановлено, що створення розумного будинку є важливим і необхідним для забезпечення комфортного та зручного проживання мешканців, особливо людей похилого віку та осіб з інвалідністю. Тому було розроблено недорогу та надійну систему домашньої автоматизації на основі Bluetooth, інтегровану з системою моніторингу якості повітря. Архітектура системи та експериментальне обладнання описані в цьому розділі.

Архітектура системи. На рисунку 3.5 зображена архітектура запропонованої системи. У цьому проєкті система не лише здійснює моніторинг домашнього середовища (температура, вологість та концентрація діоксиду вуглецю), але й забезпечує доступ і керування домашніми електричними пристроями за допомогою мобільного додатка SHControl, встановленого на смартфоні.

Користувач спочатку повинен під'єднатися до конкретного Bluetooth-пристрою, після чого може використовувати віртуальні кнопки для керування реальними апаратними пристроями. У цьому дослідженні як основний мікроконтролер використано Arduino UNO для підключення та керування іншими електронними модулями. Датчик DHT22 застосовується для моніторингу температури та вологості в домашньому середовищі. Для виявлення концентрації діоксиду вуглецю в приміщенні використано газовий датчик MQ-2. Крім того, для зв'язку між смартфоном і мікроконтролером Arduino UNO застосовано Bluetooth-модуль HC-06.

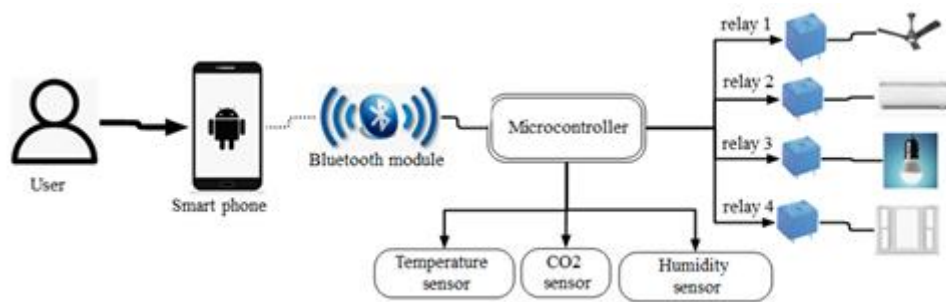


Рисунок 3.5 - Архітектура системи

Оскільки Arduino UNO не може безпосередньо підключатися до побутових електричних пристроїв з мережевою напругою, для підключення домашніх приладів (вентилятор, кондиціонер (AC), освітлення та електричне вікно) використано набір реле.

Мобільний додаток SHControl розроблено за допомогою програмного забезпечення MIT App Inventor II. Блок-схема роботи запропонованої системи наведена на рисунку 3.6.

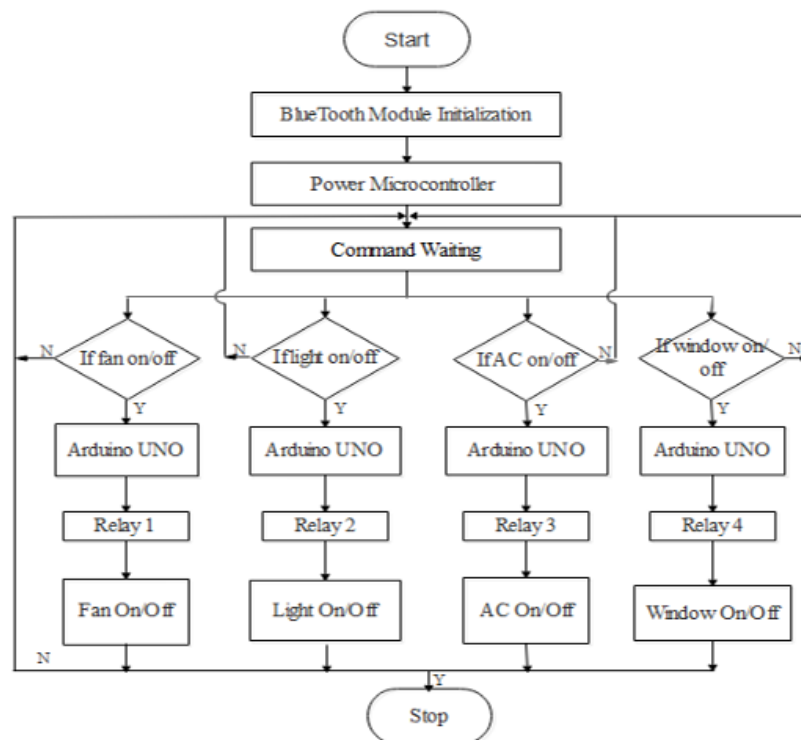


Рисунок 3.6 - Блок-схема алгоритму роботи системи

Експериментальне обладнання. Цей проєкт розроблено на базі мікроконтролера Arduino UNO у поєднанні з іншими апаратними пристроями: Bluetooth-модулем HC-06, датчиком температури та вологості DHT22 та газовим датчиком MQ-2. Arduino UNO є зручною та недорогою відкритою електронною платформою розробки. Він має середовище програмування, подібне до Java та C. Плата містить 14 цифрових портів введення/виведення (I/O), шість з яких можуть використовуватися як виходи широтно-імпульсної модуляції (PWM). Крім того, є 6 аналогових портів введення/виведення. Основним керуючим чипом Arduino є AVR або ARM. Плата характеризується кросплатформенністю, прозорістю, відкритим кодом та низькою вартістю. Тому Arduino широко застосовується та розвивається в усьому світі. Схема Arduino UNO наведена на рисунку 3.7.



Рисунок 3.7 - Arduino UNO

У цьому проєкті HC-06 використовується як модуль Bluetooth-з'єднання. Він має високу сумісність, стабільність і низький рівень втрати пакетів. На платі HC-06 інтегровано PCB-антену. Робоча напруга становить від 3,0 В до 3,6 В, струм споживання під час зв'язку — 40 мА. Модуль має чотири виводи: RXD, TXD, GND та VCC. Виводи RXD і TXD використовуються для підключення до іншого мікроконтролера для взаємної комунікації. Виводи VCC і GND призначені для живлення. Схема HC-06 наведена на рисунку 3.8.



Рисунок 3.8 - Bluetooth-модуль HC-06

Датчик DHT22 використовується для вимірювання вологості та температури навколишнього середовища. Він має 4 виводи: VCC, DATA, NC та GND. У нашому проєкті використовуються лише три виводи (крім NC). Нормальний діапазон напруги живлення VCC становить від 3 В до 5 В. Принцип роботи DHT22 ґрунтується на вбудованому ємнісному датчику вологості та термісторі. Дані передаються до контролера через вивід DATA. Максимальний робочий струм становить 2,5 мА. Характеристики датчика DHT22 наведено на рисунку 3.9.



Рисунок 3.9 - Модуль DHT22

Газовий датчик MQ-2 використовується для визначення рівня газів у навколишньому середовищі. Оскільки природний газ широко застосовується в повсякденному житті, цей датчик дозволяє виявляти витік CH_4 , CO та дим у

разі пожежі. MQ-2 характеризується швидким часом відгуку та високою чутливістю, що дозволяє проводити вимірювання якомога швидше. Датчик має широкий діапазон виявлення, швидкий відгук, стабільність, високу точність і тривалий термін служби. Він має 4 виводи: цифровий вихід, аналоговий вихід, земля та живлення. У цьому проєкті цифровий вихід (DOUT) не використовується. Схема MQ-2 наведена на рисунку 3.10.



Рисунок 3.10 - Газовий датчик MQ-2

Реле є електронним керуючим модулем, який використовується для підключення побутових приладів і керування електричними пристроями мережевої напруги за допомогою низької напруги. Реле встановлює взаємодію між системою керування та керованою системою. Воно зазвичай застосовується в системах автоматизованого керування. Реле виконує функції саморегулювання, захисту та перетворення ланцюгів. У цьому проєкті використано чотириканальне реле. Його схема наведена на рисунку 3.11.



Рисунок 3.11 - Чотириканальне реле

Схема системи зображена на рисунку 3.12.

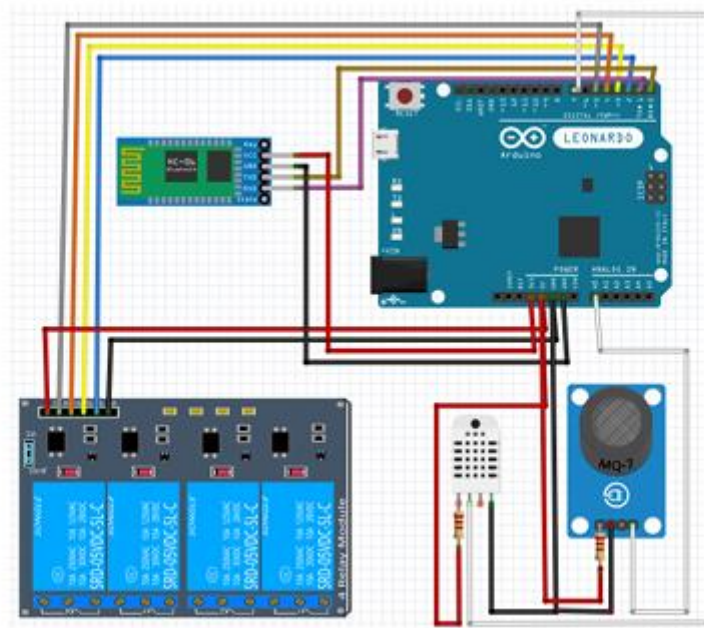


Рисунок 3.12 - Схема системи

Вихідний вивід датчика DHT22 підключено до цифрового виводу 7 мікроконтролера Arduino. Вихідний вивід датчика MQ-2 підключено до аналогового виводу 0 мікроконтролера Arduino. Вхідні виводи 1, 2, 3 і 4 чотириканального реле підключено відповідно до цифрових виводів 2, 3, 4 і 5 мікроконтролера Arduino. Виводи землі та VCC датчиків DHT22, MQ-2 і чотириканального реле підключено відповідно до виводів GND і 5V мікроконтролера Arduino. Виводи TXD і RXD модуля HC-06 підключено відповідно до виводів TX і RX мікроконтролера Arduino.

Була розроблена надійна, економічно ефективна система, яку користувачі можуть легко налаштовувати та встановлювати, для моніторингу якості повітря в приміщеннях (IAQ) на основі IoT у розумних будинках.

У розробленій системі використовувалися недорогі та високоточні датчики: CO₂ (MH-Z19A), твердих частинок (PMS7003), температури та вологості (АНТ10). Для обробки даних датчиків і передачі їх на IoT-платформу було обрано мікроконтролер ESP8266-12E з вбудованою підтримкою Wi-Fi. У більшості комерційно вироблених пристроїв для вимірювання якості повітря

запис даних на хмарний сервер зазвичай обмежується годинними середніми значеннями та періодом в один тиждень. Тому вони не можуть надавати точну інформацію про миттєво змінювані концентрації забруднювачів. Оскільки період запису даних становить один тиждень, доступ до даних старше одного тижня неможливий. Крім того, комерційні продукти не мають регулювання порогових значень забруднювачів і зазвичай призначені лише для вимірювання.

При порівнянні запропонованої системи вимірювання з комерційними аналогами вона є значно дешевшою, розширюваною (можна додавати датчики для різних забруднювачів) і забезпечує довгострокове зберігання даних (понад 1 рік) на хмарному сервері. У системі частота запису даних становить 1 хвилина, яку за потреби можна зменшити до 5 секунд. Завдяки всім цим характеристикам запропонована система вимірювання якості повітря значно перевершує своїх комерційних конкурентів. Запропонована система вимірювання є рішенням для моніторингу IAQ, яке в реальному часі вимірює як забруднювачі повітря в приміщеннях, так і кліматичні параметри та інформує користувачів про перевищення концентрацій через сповіщення в реальному часі.

Архітектурна структура запропонованої системи вимірювання представлена на рис. 3.13.

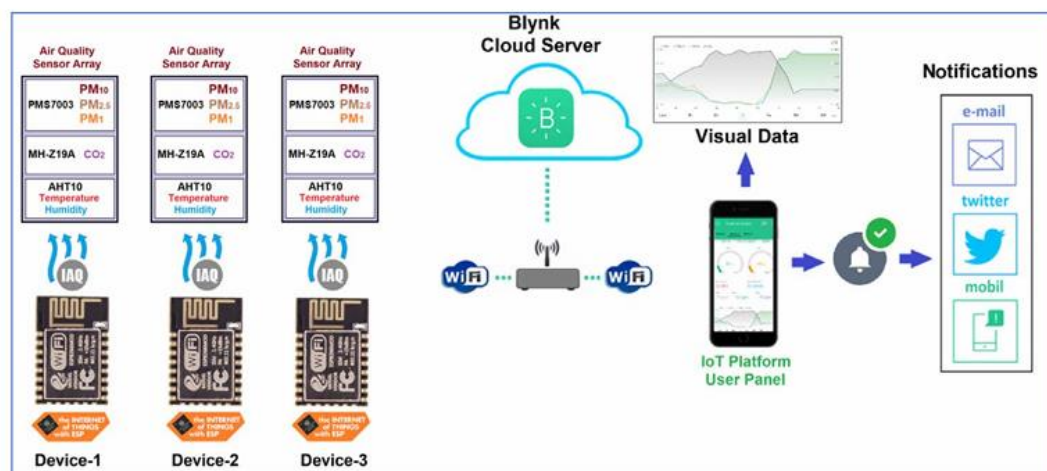


Рисунок 3.13 - Архітектура системи моніторингу IAQ на основі IoT для розумних будинків.

У запропонованій системі було отримано повністю бездротове рішення завдяки використанню мікросхеми ESP8266-12E, яка реалізує мережевий протокол IEEE 802.11 b/g/n. Цей мікроконтролер з вбудованими функціями Wi-Fi використовується одночасно як блок обробки даних і комунікаційний блок.

У цьому дослідженні як інструмент розробки мобільного інтерфейсу використовувалася IoT-платформа Blynk (версія 2.28.17). Blynk підтримує велику кількість контролерів, таких як Arduino, ESP8266, ESP32, Raspberry Pi, Onion Omega, SparkFun тощо, які широко застосовуються в IoT-застосунках. Використовуючи цю IoT-платформу, можна без написання коду за дуже короткий час розробити мобільний інтерфейс iOS/Android для IoT-проектів лише за допомогою віджетів (Widgets).

Модуль MH-Z19 NDIR інфрачервоного газового аналізу широко застосовується в системах HVAC, холодильній техніці та моніторингу IAQ. Незважаючи на низьку вартість, MH-Z19 вважається надійним, стабільним і точним датчиком для вимірювання CO₂. MH-Z19, використаний у сенсорному блоці системи моніторингу IAQ на основі IoT (див. рис. 3.13), є недисперсійним інфрачервоним (NDIR) датчиком CO₂. Він має вбудований датчик температури для температурної компенсації та не залежить від вмісту кисню. Ідеальний діапазон роботи датчика з цифровим і аналоговим виходом становить 0...50 °C за температурою та 0...95 % RH за вологістю. Діапазон вимірювання — 0...5000 ppm, термін служби — понад 5 років, середнє споживання струму — менше 10 мА. MH-Z19 має рівень інтерфейсу 3,3 В і вихідні сигнали PWM та UART [1].

PMS7003, який використовується для вимірювання значень PM₁, PM_{2.5} та PM₁₀, є високочутливим датчиком, розробленим компанією Beijing Plantower. Він розраховує кількість завислих частинок у повітрі за принципом лазерного розсіювання. Якщо зміна концентрації незначна, датчик працює в стабільному режимі з інтервалом 2,3 с; якщо зміна значна — автоматично перемикається в швидкий режим з інтервалом 0,2...0,8 с. Датчик здатний виявляти частинки розміром від 0,3 мкм до 10 мкм, працює в діапазоні температур від -10 °C до

+60 °C і відносної вологості 0...99 % RH. Розміри датчика — 50 × 38 × 21 мм, максимальне значення виходу — 500 мкг/м³. Завдяки стабільним і точним характеристикам вимірювання він використовується в багатьох комерційних системах моніторингу якості повітря [11].

АНТ10 — це датчик температури та вологості нового покоління, виготовлений компанією Aosong Electronic. Датчик видає калібрований цифровий вихід у стандартному форматі I²C. Він оснащений удосконаленим ємнісним елементом вологості на основі MEMS-технології та вбудованим елементом вимірювання температури. Його продуктивність значно перевищує надійність датчиків попереднього покоління. Під час виробництва кожен датчик калібрується та тестується, а номер партії продукту наноситься на поверхню корпусу. Ці вдосконалені мініатюризовані датчики є економічно ефективними та мають низьке енергоспоживання. Роздільна здатність датчика становить 0,024 % RH для вологості та 0,01 °C для температури. Він працює від напруги живлення 3,3 В постійного струму [5].

IoT-пристрої перетворюють дані вимірювань, отримані з інтервалом 5 секунд, на середні значення за 1 хвилину. Отримані хвилинні середні дані зберігаються на хмарному сервері Blynk Cloud. Ці дані за запитом надсилаються на зареєстровану електронну адресу у форматі csv (Comma Separated Values). Дані кожного параметра якості повітря також містять інформацію про дату та час. Таким чином, усі дані ідеально синхронізуються.

Під час запису даних у деяких випадках відбувалися перебої з підключенням до Інтернету, що призводило до від'єднання пристроїв і втрати даних. Однак завдяки частоті запису 1 хвилина на хмарному сервері було накопичено великий обсяг даних для подальшого аналізу.

Інтерфейс користувача пристроїв для вимірювання якості повітря показано на рис. 3.14(a), (b), (c). Цей інтерфейс дозволяє збирати, візуалізувати та аналізувати дані в хмарі. Графіки, що відображають дані якості повітря в мобільному інтерфейсі користувача, створеному на платформі Blynk IoT, забезпечують краще сприйняття поведінки контрольованих параметрів

порівняно з цифровим форматом. Крім того, мобільний інтерфейс забезпечує легкий і швидкий доступ до зібраних даних, а також більш точний аналіз часової динаміки параметрів якості повітря.

Таким чином, система є потужним інструментом для аналізу IAQ і підтримує прийняття рішень щодо можливих втручань для покращення здорового середовища в приміщенні.

Дані, зібрані датчиками, аналізуються мікроконтролером перед відправкою на хмарний сервер Blynk. Як видно з рис. 3.14(d), порогові значення вимірюваних параметрів якості повітря можна налаштовувати через інтерфейс користувача. У разі перевищення встановлених порогових значень для концентрації забруднювачів і кліматичних параметрів користувачам надсилаються сповіщення в реальному часі двома каналами — електронною поштою та мобільним пристроєм.

На рис. 3.14 (e) показано вікно редактора подій для надсилання сповіщень користувачам за різних умов.

У Event-1, якщо значення PM_{2.5}, надіслане з віртуального піну V21 пристроєм на кухні, перевищує встановлене користувачем значення (V22), на мобільний телефон надсилається попередження «Kitchen PM2.5 Level High».

У Event-2, якщо значення CO₂, надіслане з віртуального піну V2 пристроєм на кухні, перевищує встановлене користувачем значення V25, на зареєстровану електронну адресу надсилається попередження «Kitchen CO2 Level High».

На рис. 3.14 (f) показано електронний лист, надісланий користувачеві внаслідок спрацювання Event-2.

Реальний час сповіщень про кліматичні параметри та концентрації забруднювачів, які надсилаються мешканцям, забезпечує точні та детальні дані щодо стану житлового середовища та допомагає їм планувати заходи для покращення якості повітря в приміщеннях (IAQ). Крім того, повідомлення-сповіщення сприяють зміні поведінки та спонукають користувача діяти якомога швидше для покращення IAQ. Крім того, ці сповіщення в реальному часі

дозволяють мешканцям вживати постійних і рішучих заходів для запобігання повторенню таких нездорових ситуацій.

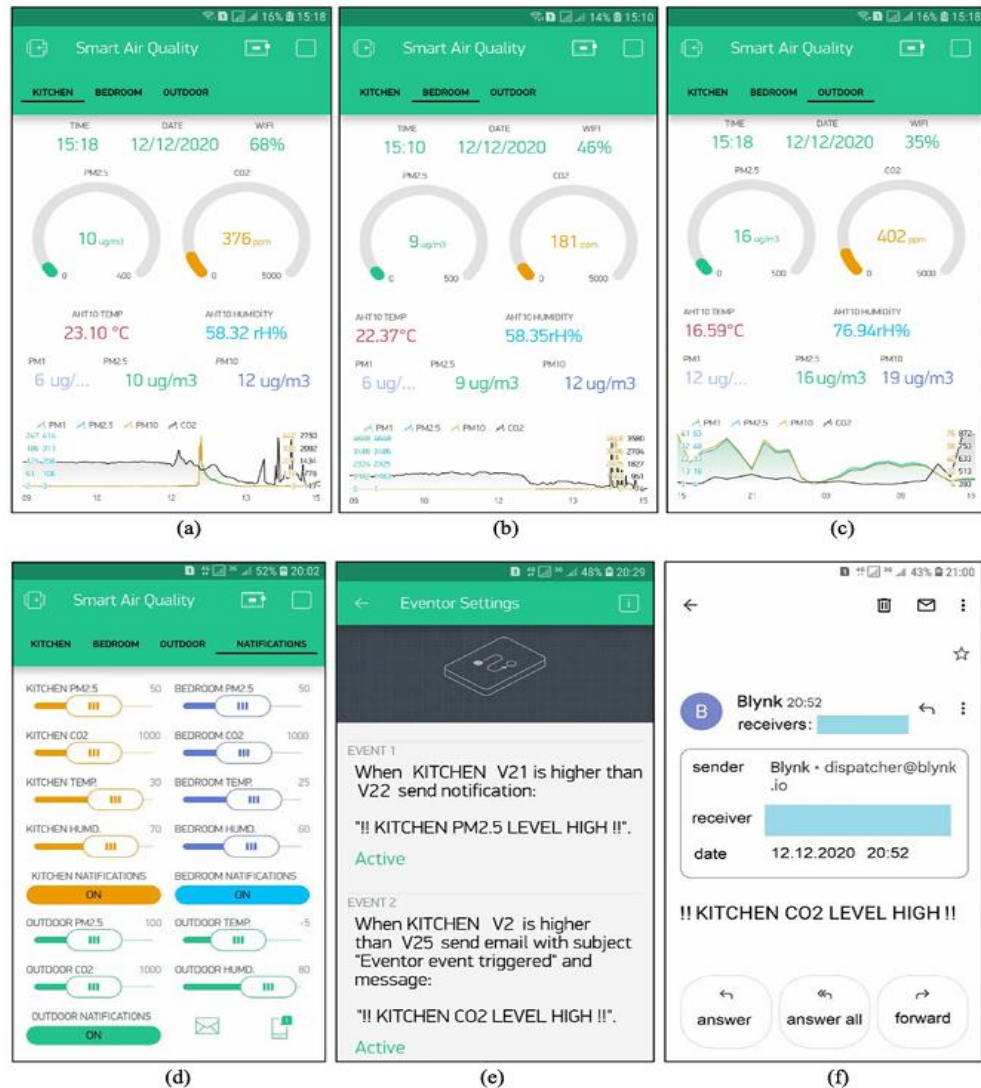


Рисунок 3.14 - Інтерфейс користувача пристрою для вимірювання якості повітря: (a), (b), (c) загальний вигляд; (d) налаштування порогових значень; (e) вікно редактора подій для сповіщень; (f) приклад електронного листа, надісланого користувачеві при спрацюванні Event-2.

Налаштування зручного для користувача інтерфейсу, за допомогою якого користувачі можуть налаштувати бездротову мережу за кілька кроків, представлено на рис. 3.15. Коли система запускається вперше, якщо вбудований Wi-Fi-модуль мікросхеми ESP8266-12E не може під'єднатися до жодної з бездротових мереж, він переходить у режим точки доступу (hotspot). Після

цього користувач може ввести облікові дані Wi-Fi-мережі для підключення до відповідної мережі. Завдяки цій функції користувачі можуть легко встановити та підготувати до використання систему моніторингу IAQ на основі IoT.

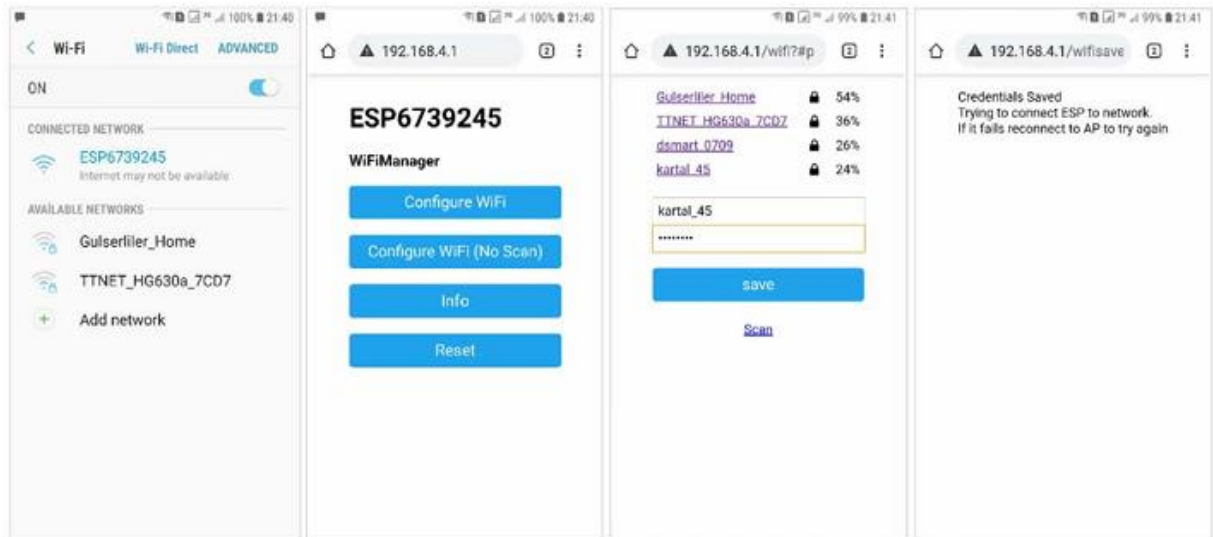


Рисунок 3.15 - Налаштування Wi-Fi пристрою.

Порівняно з найсучаснішими пристроями, налаштування Wi-Fi в системі моніторингу IAQ на основі IoT є зручним для користувача та підтримує простий процес налаштування. Ще однією перевагою системи є її модульність. За потреби можна додавати потрібну кількість точок вимірювання. Для цього новий пристрій може підключитися до Wi-Fi-мережі без будь-яких додаткових налаштувань.

Калібрування пристроїв. Пристрої з однаковими характеристиками, розроблені для системи моніторингу якості повітря на основі IoT, показані на рис. 3.16(а). Ці пристрої та еталонні пристрої спільно записували дані протягом одного тижня. Для калібрування PM₁, PM_{2.5}, PM₁₀ та CO₂ цих пристроїв використовувався Wi-Fi-монітор якості повітря «Dienmern DM72B», а для калібрування температури та вологості — Bluetooth-датчик температури-вологості. Для передачі даних, вимірюваних пристроєм, використовувався бездротовий зв'язок BLE. Дані температури та вологості цього датчика

записувалися на хмарний сервер за допомогою контролера ESP32 з вбудованим модулем BLE та платформи Blynk IoT.

Створення системи моніторингу IAQ на основі IoT та вибір датчиків здійснювалися з урахуванням мінімальної вартості та максимальної точності вимірювань. Беручи до уваги, що система вимірювання може за потреби працювати від батарей, особливу увагу приділяли вибору датчиків з низьким енергоспоживанням. Вартість одного пристрою запропонованої системи моніторингу IAQ на основі IoT. Вартість одного пристрою, розробленого для вимірювання якості повітря на основі IoT, становить 60 доларів США. Ціна деяких портативних систем вимірювання CO₂ на ринку коливається в межах 111–377 євро. Однак ці портативні пристрої не здатні аналізувати зібрані дані та приймати рішення щодо можливих втручань для покращення громадського здоров'я [32]. Тому розроблена недорога система вимірювання якості повітря з її портативністю, масштабованістю та модульністю може запропонувати надійне та ефективне рішення для систем моніторингу якості повітря порівняно з існуючими комерційними рішеннями.

3.3 Аналіз результатів роботи системи та їх оцінка

Запропонований пристрій для вимірювання якості повітря було розроблено для забезпечення виявлення якості повітря як у приміщеннях, так і на відкритому повітрі. Для процесу калібрування з 6 по 13 листопада 2025 року еталонні пристрої та три пристрої, що підлягали калібруванню, спільно збирали дані протягом одного тижня. Значення PM₁, PM_{2.5}, PM₁₀ та CO₂ були отримані з еталонного пристрою DM72B як годинні середні значення з мобільного додатка «Tuuya Smart». Значення температури та вологості збиралися з еталонного пристрою Xiaomi Miija як хвилинні середні значення, після чого ці дані були перетворені на годинні середні.

Дані PM₁, PM_{2.5}, PM₁₀, CO₂, температури та вологості для пристроїв, що калібрувалися, отримували з додатка Blynk. Протягом одного тижня було

зібрано $n = 10080$ хвилин даних. Ці дані були перетворені на $n = 168$ годинних середніх значень. Для аналізу було зібрано $n = 4320$ хвилин даних у період з 8 по 10 грудня 2026 року, які були перетворені на $n = 72$ годинних середніх значень. Дані калібрування та аналізу були зібрані за допомогою Microsoft Excel, і всі аналізи виконувалися в цій програмі.

Моделі регресії дозволяють описати взаємозв'язок між змінними шляхом підгонки лінії до спостережуваних даних. Лінійні моделі регресії використовують пряму лінію, тоді як нелінійні моделі регресії — криву лінію. Регресія дає змогу прогнозувати, як залежна змінна змінюється зі зміною незалежної змінної (змінних). Проста лінійна регресія (SLR) використовується для моделювання взаємозв'язку між двома безперервними змінними. Часто метою є прогнозування значення вихідної змінної (або відгуку) на основі значення вхідної (або прогнозуючої) змінної.

Сучасні моделі калібрування зазвичай використовують одномірну просту лінійну регресію (univariate SLR), припускаючи лінійність між відгуком датчика та еталонного пристрою [24]. Однак у польових умовах, де на результат вимірювання впливає більше ніж одна змінна, SLR часто недостатньо для досягнення високої точності вимірювання. У таких випадках для калібрування застосовують багатовимірну лінійну регресію (MLR) [6], високорозмірні моделі або гібридні моделі. Оскільки в нашому дослідженні між сирими даними та даними еталонного пристрою спостерігалася сильна лінійність, калібрування було виконано методом простої лінійної регресії (SLR).

Пристрої були відкалібровані за допомогою рівнянь підгонки кривої, отриманих методом SLR. Дані збиралися шляхом розміщення відкаліброваних пристроїв у спальні, на кухні та на відкритому повітрі (на балконі). Для визначення взаємозв'язку між зібраними даними були розраховані коефіцієнти кореляції Пірсона (PCC). PCC часто використовується для аналізу сили лінійного зв'язку між двома змінними. Це статистичний показник, який активно застосовується для кореляційного аналізу даних. Більшість досліджень [25]

використовують РСС для визначення взаємозв'язку між параметрами якості повітря. У дослідженні застосовували для аналізу взаємозв'язку різних забруднювачів повітря з температурою, вологістю та швидкістю вітру.

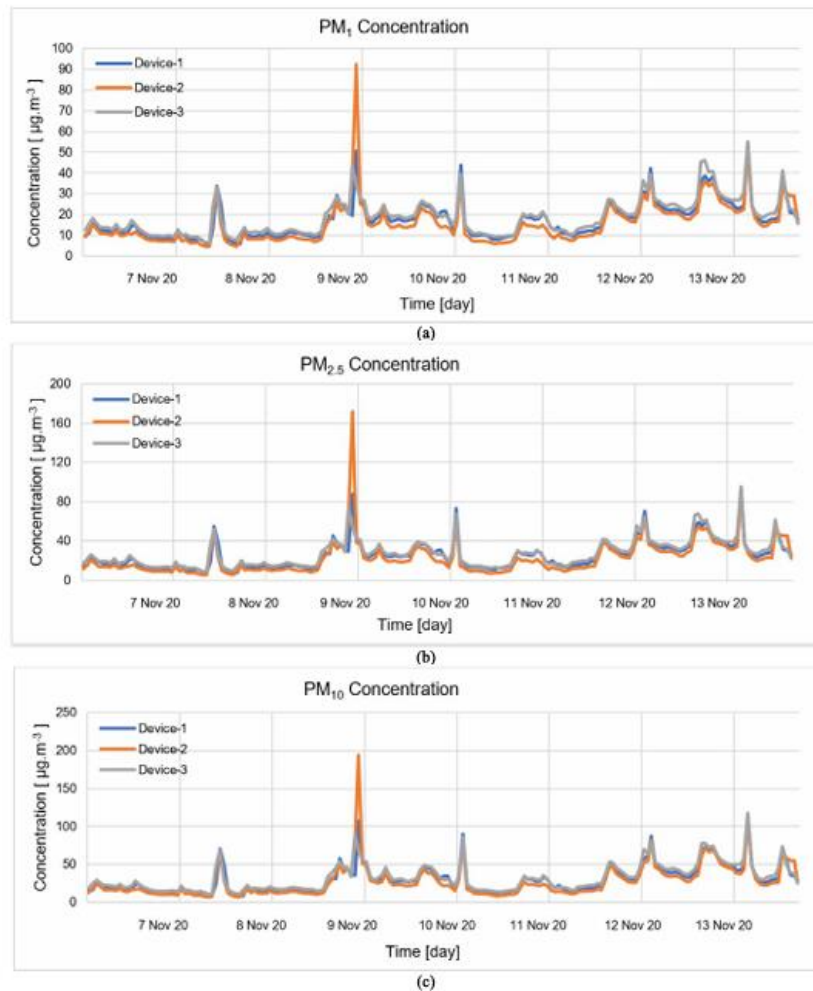


Рисунок 3.16 - Концентрації РМ пристроїв: (a) РМ₁; (b) РМ_{2.5}; (c) РМ₁₀.

У дослідженні присвяченому визначенню впливу забруднювачів повітря в приміщеннях на людей похилого віку, було встановлено, що вітальні та спальні вносять найбільший внесок. Результати та статистичний аналіз (кореляція Пірсона та t-критерій) підтвердили, що діяльність у приміщеннях (приготування їжі, куріння та прибирання) може суттєво впливати на ІАК у вітальнях і спальнях. РСС використовували для визначення взаємозв'язку між концентраціями CO₂, температурою повітря, відносною вологістю, формальдегідом та РМ у офісі, промисловій кухні та спортзалі [7]. У

дослідженні [32], де за допомогою РСС аналізувався взаємозв'язок між температурою та концентраціями $PM_{2.5}$ у приміщеннях і на відкритому повітрі, було показано, що вплив високих значень $PM_{2.5}$ зовні на значення $PM_{2.5}$ усередині приміщень є дуже значним.

Графіки даних годинних середніх значень концентрацій РМ, отриманих від пристроїв для вимірювання якості повітря протягом одного тижня, представлено на рис. 3.17. Під час вимірювання значення РМ у середовищі підвищувалися за допомогою природної вентиляції та зовнішніх джерел РМ у певні періоди часу.

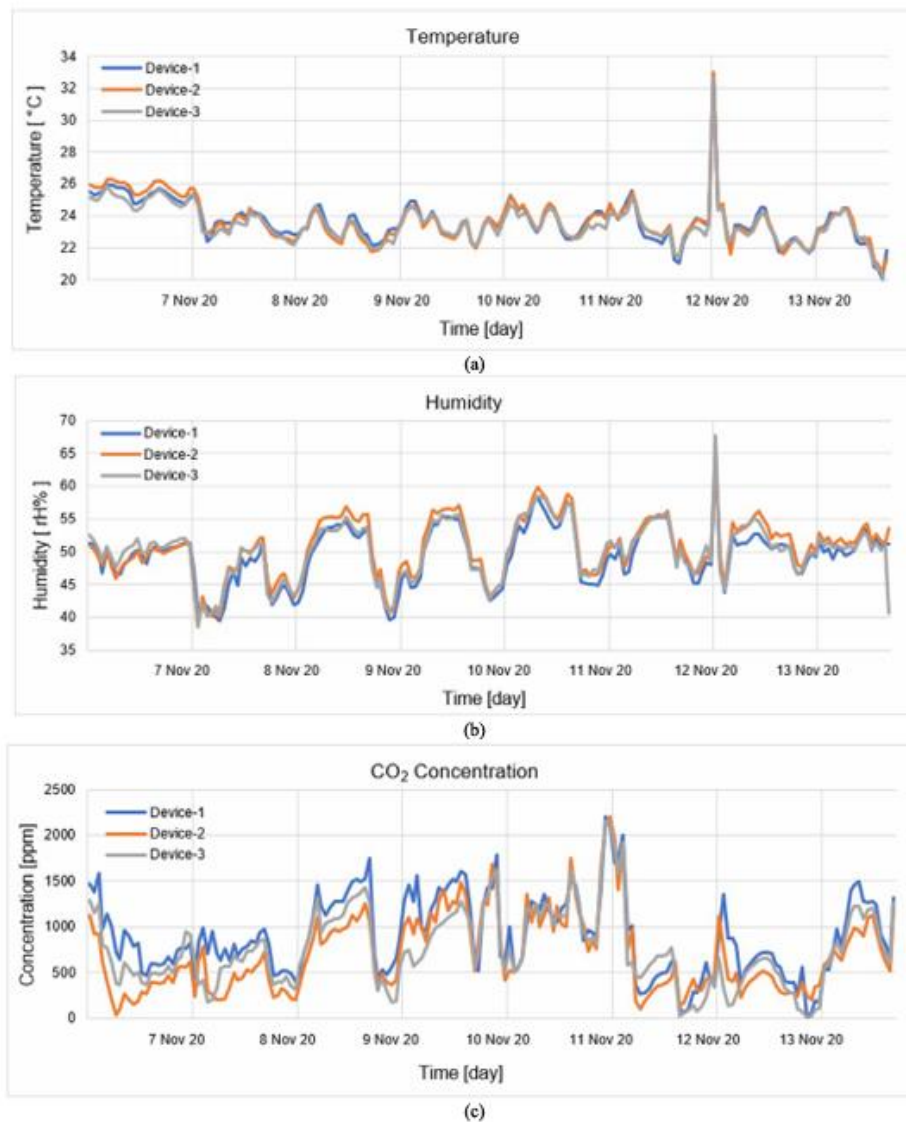


Рисунок 3.17 - Параметри якості повітря, отримані від пристроїв: (а) температура; (b) вологість; (c) концентрація CO_2 .

Годинні середні значення температури, вологості та концентрації CO₂, отримані від пристроїв для вимірювання якості повітря протягом одного тижня, показано на рис. 3.18. Температура, вологість і концентрація CO₂ змінювалися залежно від умов у приміщенні та природної вентиляції. R² (коефіцієнт детермінації) є показником, що характеризує якість прогнозування для моделей лінійної регресії. Цей показник пояснює відсоткову частку випадків, у яких незалежна змінна впливає на залежну змінну, демонструючи силу взаємозв'язку між ними в шкалі від 0 до 1 (0–100 %).

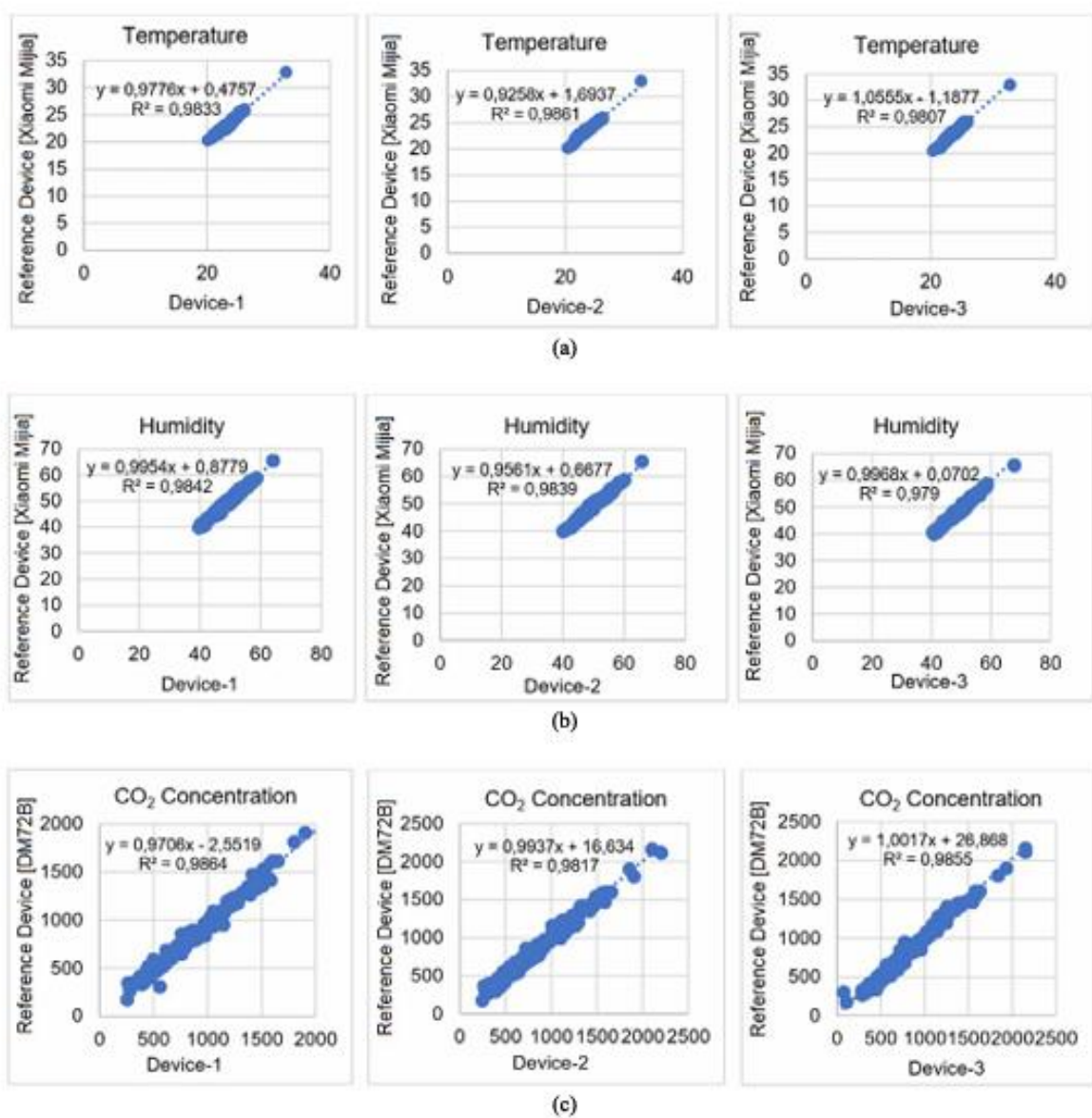


Рисунок 3.18 - Графіки SLR для пристроїв: (а) температура; (б) вологість; (с) концентрація CO₂.

Графіки простої лінійної регресії (SLR) для температури, вологості та концентрації CO₂ пристроїв для вимірювання якості повітря представлено на рис. 3.18. При аналізі графіків SLR видно, що пристрої мають високі коефіцієнти детермінації ($R^2 > 0,981$). На рис. 3.19 показано графіки SLR концентрацій PM для пристроїв вимірювання якості повітря та еталонних пристроїв. Аналогічно, коефіцієнт детермінації для концентрацій PM₁, PM_{2.5} та PM₁₀ пристроїв також є високим ($R^2 > 0,966$).

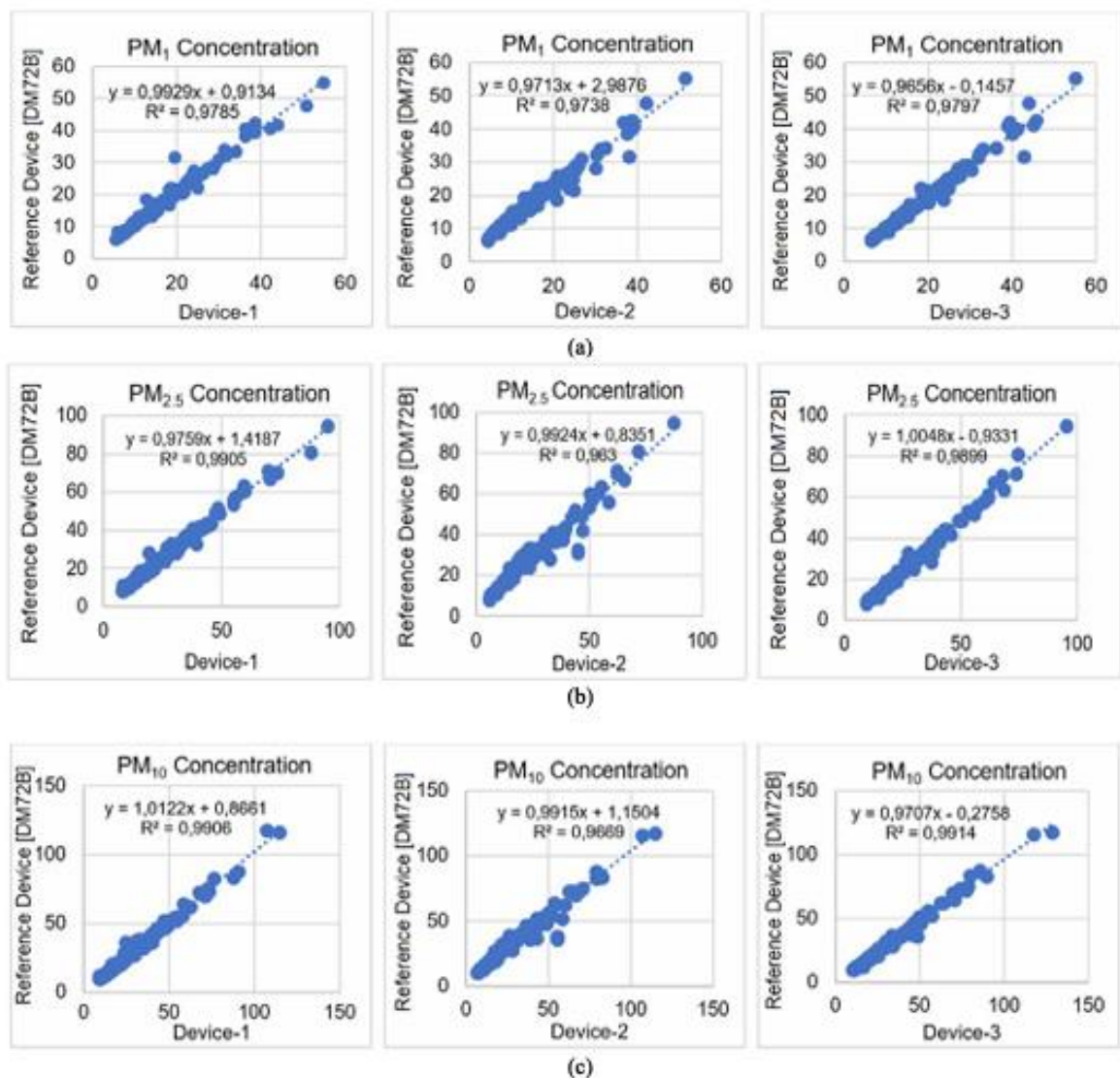


Рисунок 3.19 - Графіки SLR для пристроїв: (a) PM₁; (b) PM_{2.5}; (c) PM₁₀.

Найбільшою проблемою технології недорогих датчиків є надійність даних вимірювання. Дані, отримані від недостатньо відкаліброваних датчиків,

будуть недостатніми для якісного планування IAQ. Процес калібрування було виконано за допомогою рівнянь SLR, отриманих з даних еталонного та розроблених пристроїв. Концентрації PM_1 , $PM_{2.5}$ та PM_{10} відкаліброваних пристроїв і еталонного пристрою Dienmern DM72B представлено на рис. 3.20.

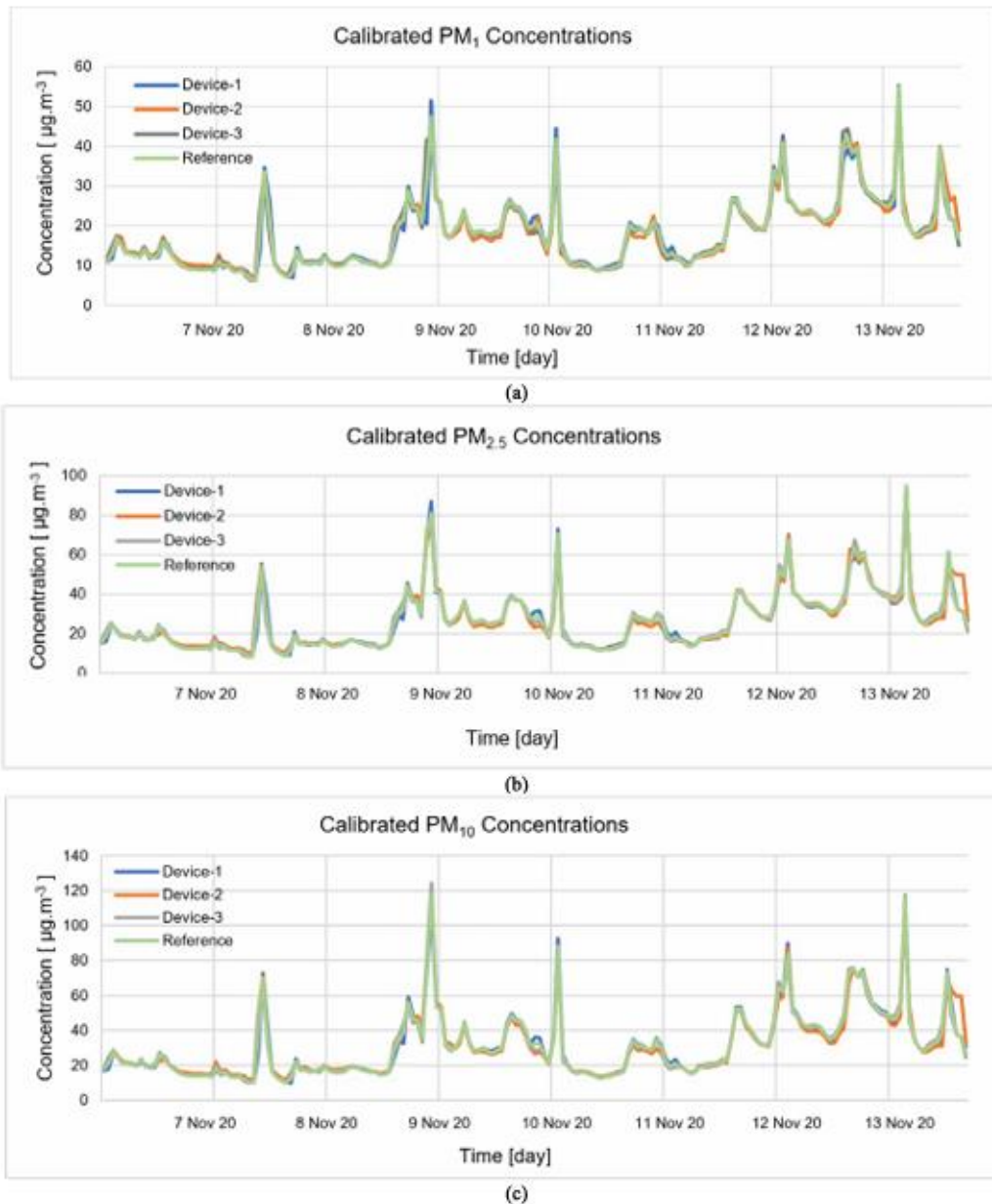


Рисунок 3.20 - Концентрації РМ відкаліброваних пристроїв: (a) PM_1 ; (b) $PM_{2.5}$; (c) PM_{10} .

Значення температури та вологості відкаліброваних пристроїв і еталонного датчика температури-вологи Xiaomi Miija представлено на рис.

3.20(a), (b). Крім того, концентрацію CO₂ відкаліброваних пристроїв і еталонного пристрою Dientern DM72B показано на рис. 3.20(c).

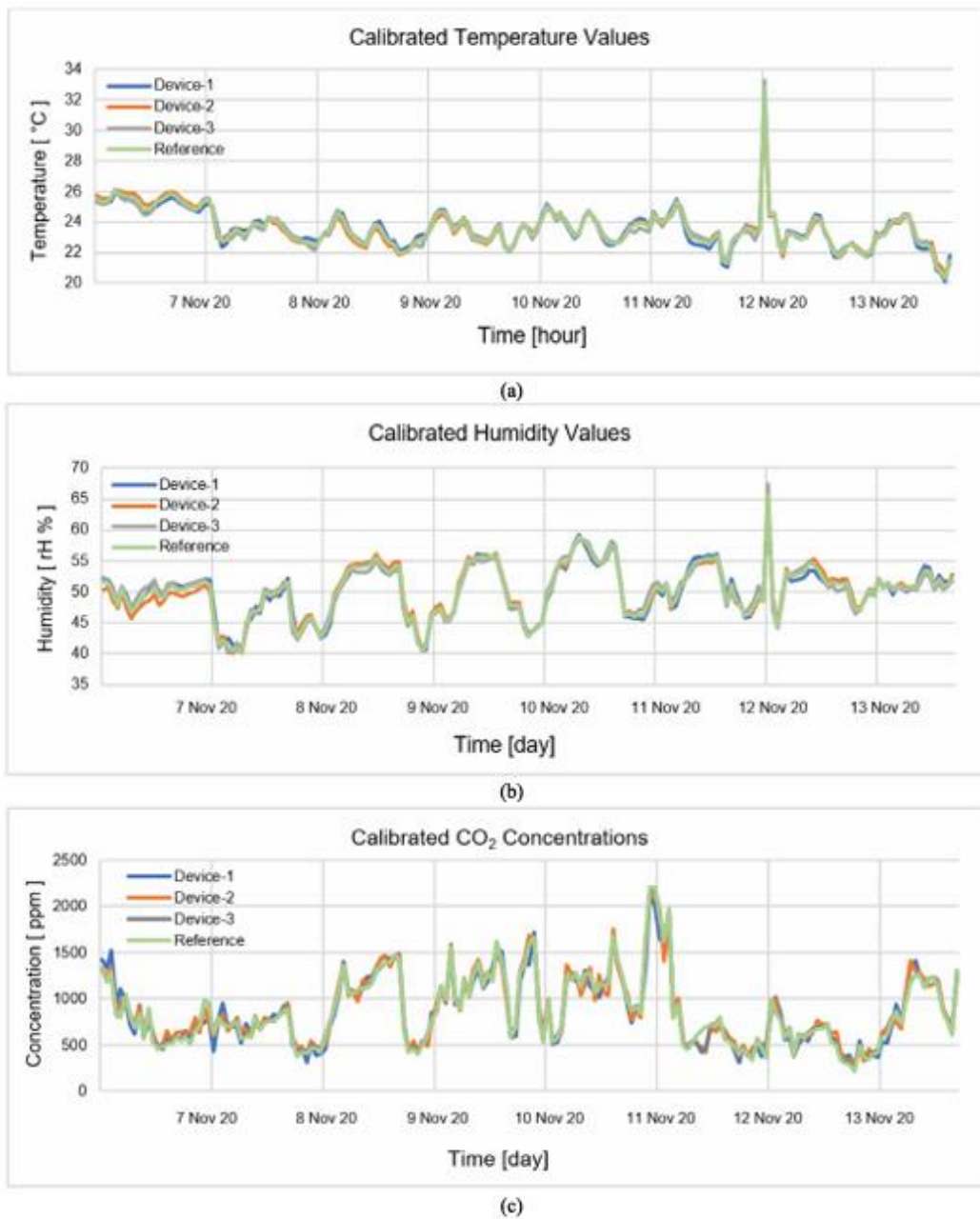


Рисунок 3.21 - Відкалібровані параметри якості повітря пристроїв: (a) температура; (b) вологість; (c) концентрація CO₂.

Два відкалібровані пристрої було розміщено всередині будинку — на кухні та в спальні, а третій — на балконі будинку для вимірювань на відкритому повітрі. Графіки даних, отриманих від пристроїв протягом 3 днів,

представлено на рисунках. Концентрації $PM_{2.5}$ відкаліброваних пристроїв представлено на рис. 3.21. У результаті аналізу 3-денних даних, зібраних з 8 по 10 грудня 2020 року, було виявлено дуже сильну кореляцію ($r = 0,976$) між концентраціями $PM_{2.5}$ пристроїв на кухні та в спальні. Також спостерігалася дуже сильна кореляція між концентрацією $PM_{2.5}$ на відкритому повітрі та на кухні ($r = 0,836$), а також між зовнішнім середовищем і спальнею ($r = 0,910$).

Унаслідок одночасної природної вентиляції на кухні та в спальні 8 грудня о 10:00 відбулося значне підвищення значення $PM_{2.5}$. Якщо до вентиляції концентрація $PM_{2.5}$ становила 39 $мкг/м^3$ на кухні та 34 $мкг/м^3$ у спальні, то після вентиляції вона зросла до 133 $мкг/м^3$ на кухні та 201 $мкг/м^3$ у спальні. Найважливішою причиною цього підвищення було те, що зовнішня концентрація $PM_{2.5}$ на момент початку вентиляції становила 254 $мкг/м^3$. Після завершення природної вентиляції, яка тривала 4 години, концентрація $PM_{2.5}$ у приміщенні на кухні та в спальні знизилася.

Концентрація $PM_{2.5}$ на кухні перед природною вентиляцією, яка розпочалася 9 грудня о 13:30, становила 41 $мкг/м^3$, а в спальні — 37 $мкг/м^3$. Зовнішня концентрація $PM_{2.5}$ на момент початку вентиляції становила 116 $мкг/м^3$. У результаті протягом 3 годин концентрація $PM_{2.5}$ на кухні зросла до 82 $мкг/м^3$, а в спальні — до 51 $мкг/м^3$. Після завершення вентиляції о 16:30 концентрація $PM_{2.5}$ на кухні та в спальні знизилася до 15 і 11 $мкг/м^3$ відповідно. Завдяки природній вентиляції, яка розпочалася 10 грудня о 12:00, коли зовнішнє значення $PM_{2.5}$ становило лише 7 $мкг/м^3$, підвищення концентрації $PM_{2.5}$ у приміщенні не відбулося.

Аналогічна ситуація спостерігалася для PM_1 та PM_{10} . Згідно з результатами аналізу, концентрація PM у приміщенні безпосередньо залежить від концентрації PM на відкритому повітрі. Відкриття дверей і вікон для природної вентиляції призводить до проникнення в приміщення невидимих для ока та невідчутних для людських органів чуття забруднювачів. Тому вимірювання даних якості повітря в реальному часі стало необхідністю для

запобігання негативному впливу низької якості повітря на якість життя за допомогою можливостей сучасних технологій.

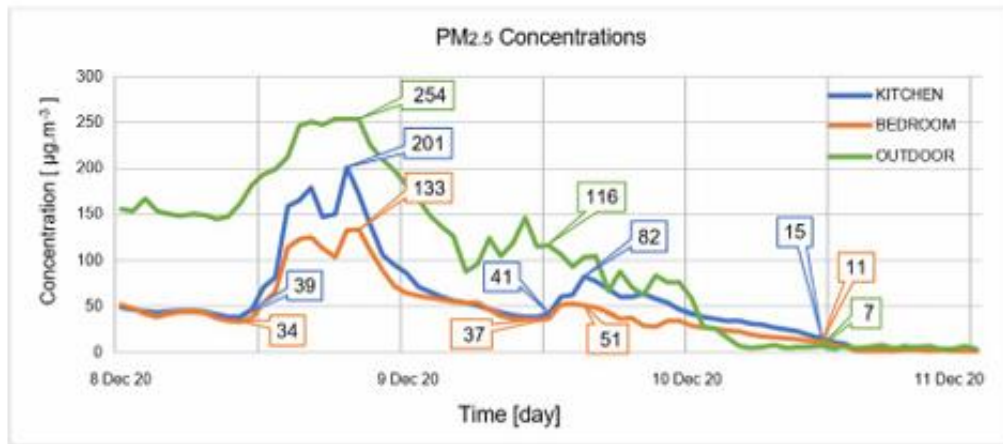


Fig. 14. Kitchen, bedroom, and outdoor PM_{2.5} concentrations.

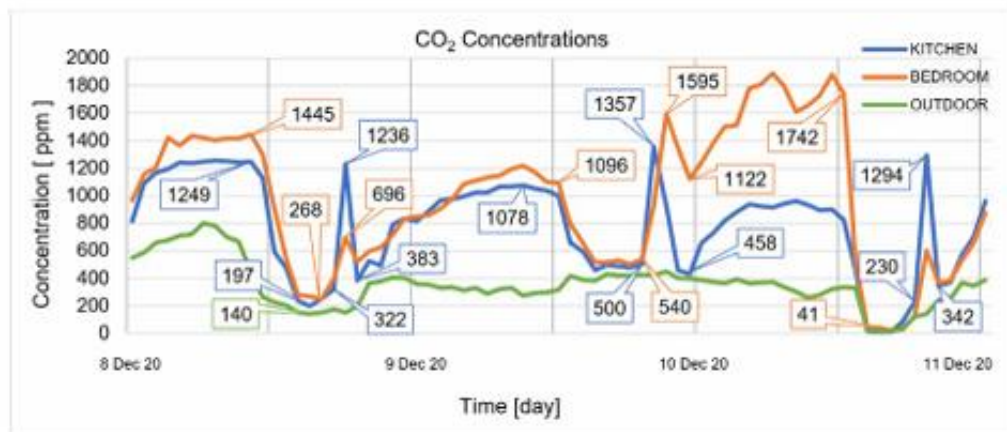


Рисунок 3.22 - Зміни концентрації CO₂ на кухні, у спальні та на відкритому повітрі.

Концентрації CO₂ у приміщенні та на відкритому повітрі показано на рис. 3.22. Спостерігається, що значення концентрації CO₂ у приміщенні, які підвищувалися вночі 8 грудня, зменшилися внаслідок природної вентиляції, яка розпочалася о 11 годині. Концентрація CO₂, яка до вентиляції становила 1445 ppm у спальні та 1249 ppm на кухні, через 2 години після початку вентиляції знизилася відповідно до 218 ppm і 133 ppm.

Концентрації CO₂, які вночі 9 грудня зросли до 1096 ppm у спальні та 1078 ppm на кухні, вранці завдяки природній вентиляції знизилися до 540 ppm і

500 ppm відповідно. Концентрація CO₂ на кухні, яка підвищилася вночі 10 грудня, після вентиляції, що розпочалася о 13 годині, знизилася з 1742 ppm до 41 ppm.

Діяльність з приготування їжі на кухні безпосередньо впливає на концентрацію CO₂. Концентрація CO₂ на кухні, яка до початку приготування їжі 8 грудня о 18 годині становила 322 ppm, зросла до 1236 ppm. Завдяки природній вентиляції вона знизилася до 383 ppm. Концентрація CO₂, яка до початку приготування їжі 9 грудня о 19 годині становила 500 ppm, зросла до 1357 ppm і знизилася до 458 ppm після завершення вентиляції. Аналогічно, концентрація CO₂, яка до початку приготування їжі 10 грудня о 18 годині становила 230 ppm, зросла до 1294 ppm і знизилася до 342 ppm після завершення вентиляції.

Зростання концентрації CO₂ внаслідок приготування їжі на кухні безпосередньо впливає на інші житлові приміщення. Увечері 8 грудня концентрація CO₂ у спальні, яка до початку приготування їжі становила 268 ppm, зросла до 696 ppm. Аналогічно, увечері 9 грудня концентрація CO₂ у спальні перед приготуванням їжі становила 540 ppm і зросла до 1595 ppm. Після природної вентиляції на кухні, що відбулася після приготування їжі, концентрація CO₂ у спальні також знизилася до 1122 ppm.

За результатами аналізу 3-денних даних було встановлено сильну кореляцію ($r = 0,732$) між концентраціями CO₂ на кухні та в спальні. Спостерігалася сильна кореляція ($r = 0,626$) між зовнішньою концентрацією CO₂ та концентрацією на кухні та помірною кореляцією ($r = 0,537$) між зовнішнім середовищем і спальнею. Завдяки природній вентиляції значення концентрації CO₂ у приміщенні зменшуються або збільшуються безпосередньо залежно від зовнішньої концентрації CO₂, подібно до концентрації PM у приміщенні. Тому перед природною вентиляцією необхідно мати інформацію про концентрацію PM і газу CO₂ на відкритому повітрі. Інакше замість зниження концентрації PM і CO₂ у приміщенні можна ненавмисно її підвищити.

Графік 3-денних даних температури в приміщенні та на відкритому повітрі представлено на рис. 3.23. Будинок, у якому збиралися дані, опалюється

централізованою системою опалення. Спостерігається дуже сильна позитивна кореляція ($r = 0,855$) між температурами на кухні та в спальні. Через діяльність з приготування їжі на кухні температура там зазвичай вища, ніж у спальні. Існує слабка негативна кореляція ($r = -0,255$) між зовнішньою температурою та температурою в спальні та ($r = -0,251$) між зовнішньою температурою та температурою на кухні. Ці значення свідчать про те, що температура в приміщенні завдяки централізованому опаленню не залежить від зовнішнього середовища.

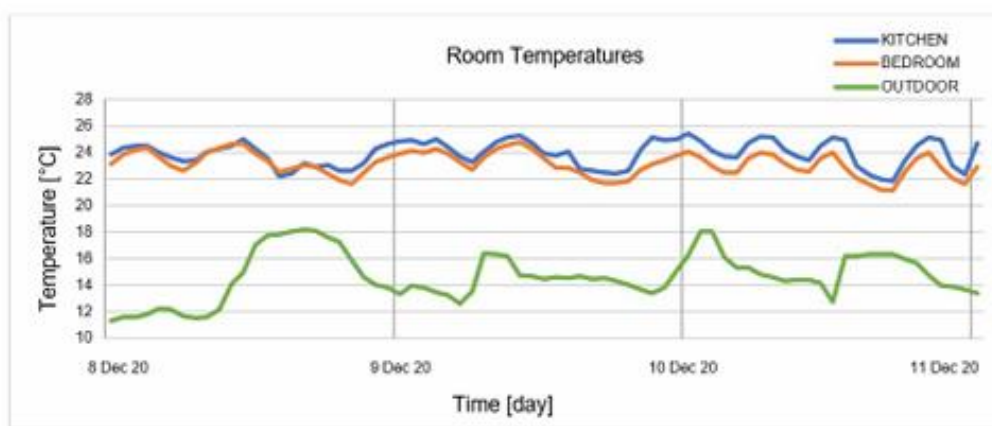


Fig. 16. Temperature changes in the kitchen, bedroom, and outdoor environment.

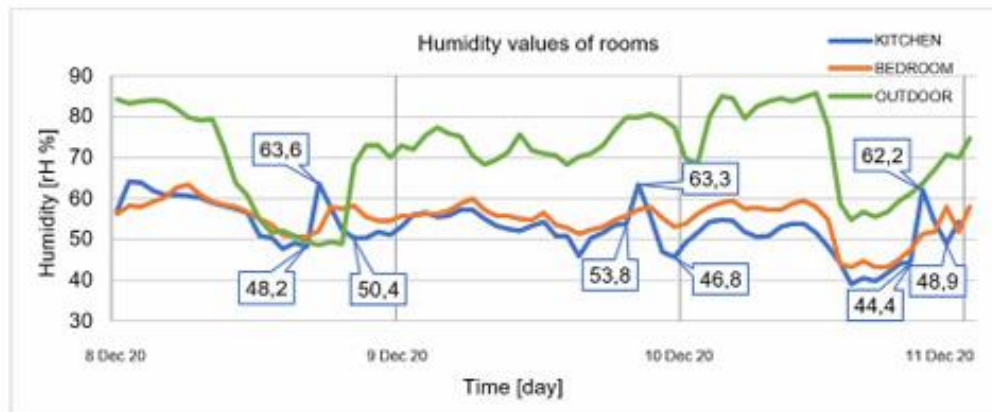


Рисунок 3.23 - Зміни відносної вологості на кухні, у спальні та на відкритому повітрі.

Графік значень відносної вологості в приміщенні та на відкритому повітрі представлено на рис. 3.23. Спостерігається сильна позитивна кореляція

($r = 0,748$, $p < 0,001$) між значеннями відносної вологості на кухні та в спальні. Існує сильна кореляція ($r = 0,642$) між зовнішньою вологістю та вологістю в спальні та помірна кореляція ($r = 0,429$) між зовнішньою вологістю та вологістю на кухні. Було виявлено, що відносна вологість підвищувалася внаслідок діяльності з приготування їжі на кухні. Значення вологості, яке на кухні до початку приготування їжі 8 грудня о 18 годині становило 48,2 % RH, під час приготування зросло до 63,6 % RH, а після вентиляції знизилося до 50,4 % RH. Аналогічна ситуація спостерігалася 9 і 10 грудня.

Наведено матрицю PСС даних, отриманих від пристроїв, розміщених на кухні, у спальні та на балконі. Матриця, отримана за допомогою двовимірного аналізу Пірсона, визначає силу лінійних взаємозв'язків між концентраціями забруднювачів у приміщенні та на відкритому повітрі. Результати в таблиці 3 демонструють дуже сильну позитивну кореляцію ($r \geq 0,836$, $p < 0,001$) між концентраціями PM_{2.5} у приміщенні та на відкритому повітрі. Спостерігалася помірна кореляція між температурою та CO₂, а також сильна позитивна кореляція між вологістю та CO₂ у спальні та на кухні. Однак між зовнішньою температурою та CO₂ існує сильна негативна кореляція ($r = -0,750$, $p < 0,001$). Високі позитивні значення кореляції $r = 0,686$, $r = 0,757$ та $r = 0,679$ ($p < 0,001$) спостерігалися між CO₂ та відотною вологістю відповідно на кухні, у спальні та на відкритому повітрі.

Аналіз даних у приміщенні показав, що IAQ часто перевищувала межі, які вважаються нормальними для здорового щоденного життя. Для кращого розуміння якості повітря в усьому будинку було б доцільніше розмістити датчик у кожній кімнаті. Таким чином, взаємодію якості повітря між кімнатами можна буде виявити більш чітко.

Удосконалений мобільний інтерфейс підвищує обізнаність користувачів щодо IAQ, дозволяючи переглядати дані як числові значення або у вигляді часових рядів.

Це дослідження представляє недорогий підхід на основі IoT для моніторингу якості повітря в приміщеннях. Результати показують, що недорогі

датчики та компоненти IoT можуть бути достатніми для моніторингу та покращення IAQ.

ВИСНОВКИ

У ході виконання дипломної роботи було розроблено мікроконтролерну систему IoT моніторингу якості повітря приміщень на основі ATmega328, яка є комплексним рішенням, спрямованим на забезпечення ефективного контролю параметрів повітря, автоматизованого збору та обробки даних. У роботі проаналізовано існуючі підходи до систем моніторингу якості повітря, досліджено їхні переваги та недоліки, а також реалізовано функціональні можливості системи, що відповідають вимогам до надійності, точності та енергоефективності. Процес розробки охопив аналіз предметної області, формування вимог, моделювання структури системи, вибір апаратних компонентів, реалізацію та тестування, що забезпечило створення цілісного та працездатного рішення.

На початковому етапі було проведено аналіз вимог до системи, визначено основні параметри якості повітря та джерела їх впливу. Функціональні можливості системи, зокрема вимірювання показників повітря, їх обробка та передача користувачу, були доповнені вимогами до енергоефективності, стабільності роботи та простоти використання. Моделювання структури системи дозволило визначити взаємодію між датчиками, мікроконтролером та засобами передачі даних, а також виявити ключові задачі, пов'язані з обробкою сигналів і забезпеченням точності вимірювань.

У процесі реалізації було створено апаратно-програмний комплекс, що забезпечує збір даних з датчиків якості повітря, їх первинну обробку та передачу для подальшого аналізу. Особливу увагу приділено організації ефективної роботи мікроконтролера, оптимізації обробки даних та зниженню енергоспоживання системи. Реалізація також включала розробку алгоритмів обробки вимірювань і формування результатів у зручному для користувача вигляді.

Під час тестування системи було перевірено її працездатність, точність вимірювань та стабільність функціонування в різних умовах. Тестування

дозволило виявити можливі обмеження, зокрема вплив зовнішніх факторів на точність датчиків та затримки при передачі даних, що стало підставою для подальшої оптимізації алгоритмів обробки та структури системи.

Загалом, розроблена система відповідає поставленим цілям: вона забезпечує ефективний моніторинг якості повітря в приміщеннях, автоматизований збір та обробку даних, а також їх зручне представлення користувачу. Перевагами запропонованого підходу є доступність, компактність, енергоефективність і можливість інтеграції в IoT-середовище. Водночас, існують певні обмеження, зокрема необхідність калібрування датчиків і підвищення точності вимірювань у складних умовах експлуатації.

У майбутньому систему можна вдосконалити шляхом розширення набору датчиків, впровадження більш складних алгоритмів аналізу даних, а також інтеграції з іншими системами «розумного будинку». Це дозволить підвищити функціональність системи та зробити її більш ефективною для контролю якості повітря і забезпечення комфортних умов у приміщеннях.

СПИСОК ПОСИЛАНЬ НА ДЖЕРЕЛА

1. Arduino Documentation. (2025). <https://docs.arduino.cc>
2. Microchip Technology. (2024). ATmega328/P Datasheet. <https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/ATmega328P-DataSheet.pdf>
3. World Health Organization. (2023). Air Quality Guidelines. <https://www.who.int>
4. United States Environmental Protection Agency (EPA). (2024). Indoor Air Quality. <https://www.epa.gov/indoor-air-quality-iaq>
5. Bosch Sensortec. (2024). BME280 Sensor Datasheet. <https://www.bosch-sensortec.com>
6. Winsen Electronics. (2024). MQ Gas Sensors Manual. <http://www.winsen-sensor.com>
7. Sensirion. (2024). SHT3x Sensor Documentation. <https://sensirion.com>
8. Honeywell. (2024). Air Quality Sensors Overview. <https://www.honeywell.com>
9. ZigBee Alliance. (2023). ZigBee Specification. <https://zigbeealliance.org>
10. IEEE. (2022). IEEE 802.15.4 Standard. <https://ieeexplore.ieee.org>
11. MQTT Protocol Specification. (2023). <https://mqtt.org>
12. Shelby, Z., & Bormann, C. (2016). 6LoWPAN: The Wireless Embedded Internet. Wiley.
13. Al-Fuqaha, A., et al. (2015). Internet of Things: A Survey. IEEE Communications Surveys & Tutorials.
14. Vermesan, O., & Friess, P. (2014). Internet of Things: From Research to Innovation. River Publishers.
15. Monk, S. (2017). Programming Arduino: Getting Started with Sketches. McGraw-Hill.
16. Banzi, M., & Shiloh, M. (2014). Getting Started with Arduino. Maker Media.

17. Richardson, M., & Wallace, S. (2012). Getting Started with Raspberry Pi. O'Reilly.
18. Karl, H., & Willig, A. (2005). Protocols and Architectures for Wireless Sensor Networks. Wiley.
19. Chong, C. Y., & Kumar, S. P. (2003). Sensor Networks: Evolution, Opportunities, and Challenges.
20. Kumar, A., et al. (2019). IoT-Based Smart Air Quality Monitoring System. IEEE.
21. Zhang, Y., et al. (2020). Air Quality Monitoring System Based on IoT. Sensors Journal.
22. Kumar, S., & Jasuja, A. (2017). Air Quality Monitoring System Based on IoT.
23. Gubbi, J., et al. (2013). Internet of Things (IoT): A Vision. Future Generation Computer Systems.
24. Borgia, E. (2014). The Internet of Things Vision: Key Features, Applications.
25. Postscapes. (2024). IoT Applications. <https://www.postscapes.com>
26. Arduino IDE Documentation. (2025). <https://www.arduino.cc/en/software>
27. ESP8266 Documentation. (2024). <https://www.espressif.com>
28. ESP32 Technical Reference. (2024). <https://www.espressif.com>
29. OpenWeather API Documentation. (2025). <https://openweathermap.org/api>
30. ThingSpeak IoT Platform. (2025). <https://thingspeak.com>
31. Blynk IoT Platform. (2025). <https://blynk.io>
32. Cayenne IoT Platform. (2024). <https://cayenne.mydevices.com>
33. ISO 16000-1:2019. Indoor Air Quality Standards.
34. European Environment Agency. (2024). Air Pollution Reports. <https://www.eea.europa.eu>
35. Dutta, P., et al. (2009). Common Sense: Participatory Urban Sensing.

36. Hart, J. K., & Martinez, K. (2006). Environmental Sensor Networks.
37. Maag, B., et al. (2018). Survey on Sensor Calibration in Air Pollution Monitoring.
38. Lewis, A., & Edwards, P. (2016). Validate Personal Air-Pollution Sensors. Nature.
39. Kumar, P., et al. (2015). The Rise of Low-Cost Sensing for Air Pollution Monitoring.
40. Spinelle, L., et al. (2017). Field Calibration of Air Quality Sensors. Atmospheric Measurement Techniques.