

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ
Факультет ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

ПОГОДЖЕНО
Декан факультету Інформаційних
технологій
_____ Ігор БОЛБОТ
(підпис)
«__» _____ 2026 р.

ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ
Завідувач кафедри Комп'ютерних систем, мереж
та кібербезпеки
_____ Дмитро КАСАТКІН
(підпис)
«__» _____ 2026 р.

БАКАЛАВРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

На тему: «Розробка системи контролю задимленості приміщень»

Спеціальність F7 «Комп'ютерна інженерія

Освітньо-професійна програма «Комп'ютерна інженерія»

Гарант освітньої програми
канд. к.фіз.-мат.н, доцент

(підпис)

Євгеній НІКІТЕНКО

Керівник бакалаврської
кваліфікаційної роботи
к.фіз.-мат.н, доцент

(підпис)

Євгеній НІКІТЕНКО

Виконав

(підпис)

Вячеслав АРХИПОВ

КИЇВ-2026

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ**
Факультет ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
комп'ютерних систем, мереж та кібербезпеки
канд. пед. наук, доцент _____ Дмитро КАСАТКІН
« ____ » _____ 20 ____ р.

З А В Д А Н Н Я
ДО ВИКОНАННЯ БАКАЛАВРСЬКОЇ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ
ЗДОБУВАЧУ

Архипов Вячеслав Вікторович

(прізвище, ім'я, по батькові)

Спеціальність «Комп'ютерна інженерія»

Освітньо-професійна програма «Комп'ютерна інженерія»

Тема кваліфікаційної бакалаврської роботи
«Розробка системи контролю задимленості приміщень»

затверджена наказом ректора НУБіП України від « 12 » ____ 10 ____ 2025 р. № 3072 «С»

Термін подання завершеної роботи на кафедру « ____ » ____ 2026 р.

Вихідні дані до бакалаврської кваліфікаційної роботи

Перелік питань, що підлягають дослідженню:

Перелік графічного матеріалу (за необхідності).

Дата видачі завдання “ ____ ” ____ 2026 р.

Керівник бакалаврської
кваліфікаційної роботи
к.фіз.-мат.н, доцент

(підпис)

Євгеній НІКІТЕНКО

Вячеслав АРХИПОВ

Завдання взяв до виконання

(підпис)

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної бакалаврської роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз вимог до системи	20. 03. 2026	Виконано
2	Проектування системи	01. 04. 2026	Виконано
3	Реалізація системи	12. 04. 2026	Виконано
4	Тестування системи	14. 04. 2026	Виконано
5	Оформлення пояснювальної записки	18. 05. 2026	Виконано
6	Оформлення графічного матеріалу	19. 05. 2026	Виконано

Студент

_____ Архипов В.В
(підпис) (ініціали та прізвище)

Керівник проекту (роботи) _____

Нікітенко Є.В.
(підпис) (ініціали та прізвище)

Реферат

Пояснювальна записка : 60 сторінок, 19 рисунків, 7 таблиці, 1 додаток, 11 джерел.

КОНТРОЛЬ ЗАДИМЛЕНOSTІ, МІКРОКОНТРОЛЕР, ДАТЧИК ДИМУ, ПОЖЕЖНА БЕЗПЕКА, АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА, КОМП'ЮТЕРНА ІНЖЕНЕРІЯ, ОПОВІЩЕННЯ.

Об'єкт дослідження – процеси моніторингу стану повітряного середовища та детектування факторів пожежі (задимленості) у закритих приміщеннях.

Предмет дослідження – архітектура, апаратне та програмне забезпечення мікропроцесорної системи для автоматизованого контролю рівня задимленості.

Мета роботи – розробка комп'ютерної системи контролю задимленості приміщень, що забезпечує оперативне виявлення підвищеної концентрації продуктів згоряння та оповіщення користувачів. Дипломна робота складається з 4 розділів:

У першому розділі проведено аналіз сучасних методів та засобів контролю задимленості, розглянуто існуючі типи датчиків та обґрунтовано доцільність розробки власної системи.

У другому розділі здійснено обґрунтування вибору апаратної бази, зокрема мікроконтролера та сенсорів газу, розроблено структурну та принципову електричну схеми системи.

У третьому розділі розроблено алгоритм функціонування системи та програмне забезпечення для збору, обробки та візуалізації даних у реальному часі.

У четвертому розділі проведено тестування розробленої системи в різних режимах роботи, виконано аналіз отриманих результатів та оцінку точності спрацювання датчиків.

Результатом виконання дипломної роботи є створена комп'ютерна система задимленості приміщення

Зміст

Календарний план (підпис) (ініціали та прізвище)	3
Реферат	4
Скорочення та умовні позначки	6
Вступ	8
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ ТА ПОСТАНОВКА ЗАВДАННЯ	9
1.1 Аналіз сучасних методів та засобів контролю задимленості приміщень	9
1.2 Основні задачі системи контролю задимленості	10
1.3 Визначення об'єктів автоматизації	13
РОЗДІЛ 2 ПРОЄКТУВАННЯ КОМП'ЮТЕРНОЇ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ	29
2.1 Розробка структурної схеми системи	29
2.3. Проектування принципової електричної схеми	32
РОЗДІЛ 3 – ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ СИСТЕМИ	47
РОЗДІЛ 4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ТЕСТУВАННЯ СИСТЕМИ	61
Додаток А	69

Скорочення та умовні позначки

ПЗ – програмне забезпечення.

МК – мікроконтролер.

ПК – персональний комп'ютер.

ІТ – інформаційні технології.

КІ – комп'ютерна інженерія.

БЖ – блок живлення.

ПЗУ – постійний запам'ятовуючий пристрій.

ОЗУ – оперативний запам'ятовуючий пристрій.

АСК – автоматизована система керування.

АЦП – аналого-цифровий перетворювач.

ШІМ – широтно-імпульсна модуляція.

ККД – коефіцієнт корисної дії.

API – інтерфейс прикладного програмування (Application Programming Interface).

BOM – відомість матеріалів (Bill of Materials).

CPU – центральний процесор (Central Processing Unit).

GPIO – контакти введення/виведення загального призначення (General Purpose Input/Output).

I2C – послідовна шина даних для зв'язку інтегральних схем (Inter-Integrated Circuit).

IoT – інтернет речей (Internet of Things).

LED – світловипромінюючий діод (Light Emitting Diode).

MQTT – протокол передачі повідомлень (Message Queuing Telemetry Transport).

Вступ

Забезпечення пожежної безпеки в житлових, офісних та виробничих приміщеннях залишається одним із пріоритетних завдань сучасної комп'ютерної інженерії. Статистика пожеж свідчить, що більшість трагічних випадків стається через запізніле виявлення задимлення, особливо в нічний час або в ізольованих приміщеннях. Розвиток технологій Інтернету речей (IoT) та доступність малогабаритних мікроконтролерних систем дозволяють створювати високоефективні та бюджетні рішення для локального моніторингу стану повітря.

Розробка автономної системи контролю задимленості, здатної не лише подавати звуковий сигнал, а й інтегруватися в загальну інформаційну мережу будівлі для оперативного сповіщення власників та служб порятунку, є актуальним науково-технічним завданням. Це дозволяє мінімізувати матеріальні збитки та, що найважливіше, зберегти людські життя.

РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ ТА ПОСТАНОВКА ЗАВДАННЯ

1.1 Аналіз сучасних методів та засобів контролю задимленості приміщень

Ефективність систем протипожежного захисту безпосередньо залежить від швидкості та точності детектування первинних факторів горіння, серед яких задимленість є найбільш раннім та показовим індикатором небезпеки. Сучасна комп'ютерна інженерія пропонує широкий спектр апаратних рішень для моніторингу стану повітряного середовища, які базуються на різних фізичних принципах виявлення зважених часток (аерозолів) у повітрі.

Основними методами, що використовуються в сучасних засобах контролю задимленості, є:

Оптико-електронний метод. Базується на розсіюванні або поглинанні інфрачервоного випромінювання частками диму. В основі таких систем лежить пара «світлодіод – фотодіод». У разі потрапляння диму в оптичну камеру, світловий промінь розсіюється і потрапляє на фотоприймач, що призводить до спрацювання логічної схеми пристрою.

Іонізаційний метод. Використовує принцип вимірювання струму іонізації повітря. При появі часток диму в робочій камері рух іонів сповільнюється, що реєструється мікропроцесорною частиною системи. Цей метод є високоефективним для виявлення відкритого полум'я, проте має певні обмеження через використання слабких радіоактивних джерел (наприклад, Американ-241).

1.2 Основні задачі системи контролю задимленості

Для досягнення мети роботи та забезпечення високої надійності функціонування, розроблювана комп'ютерна система повинна вирішувати комплекс взаємопов'язаних задач, що охоплюють апаратний, програмний та комунікаційний рівні архітектури. Проектування системи базується на принципі багаторівневої обробки інформації, де кожен етап — від фізичного контакту сенсора з газовим середовищем до передачі повідомлення користувачу — має відповідати суворим вимогам до точності та швидкодії.

Першочерговою задачею є організація безперервного та стабільного моніторингу повітряного середовища. Оскільки задимлення може мати різну динаміку поширення, система має здійснювати зчитування даних з аналогових сенсорів MQ-2 та MQ-7 із високою частотою дискретизації. Це дозволяє не лише фіксувати поточну концентрацію продуктів згоряння, чадного газу та часток сажі, а й накопичувати статистичну вибірку для подальшого аналізу. Стабільність збору даних на апаратному рівні забезпечується за рахунок фільтрації наводок та стабілізації опорної напруги АЦП мікроконтролера ESP32.

Важливою програмною задачею є інтелектуальна обробка отриманих сигналів. Оскільки напівпровідникові сенсори схильні до впливу зовнішніх завад, таких як коливання вологості, наявність пари або дрібнодисперсного пилу, програмне забезпечення повинно реалізовувати алгоритми первинної фільтрації цифрового шуму. Це передбачає аналіз динаміки зміни показників у часі: система має ідентифікувати швидке зростання концентрації як загрозу, одночасно відсікаючи короткочасні сплески напруги, що дозволяє мінімізувати ризик хибних спрацювань. Математична модель обробки включає порівняння поточних значень із встановленими програмними порогоми (Threshold values), що калібруються під конкретні умови експлуатації.

Задача світло-звукової індикації стану відповідає за безпосереднє оповіщення людей, які знаходяться всередині об'єкта. Локальна підсистема сигналізації на базі п'єзовипромінювача та світлодіодних індикаторів повинна працювати за пріоритетним принципом. У разі виявлення критичного рівня задимленості, мікроконтролер має негайно активувати переривання для звукового сигналу, потужність якого відповідає санітарним нормам, та перемикати світлову індикацію з режиму очікування у режим тривоги. Це гарантує привернення уваги навіть в умовах обмеженої видимості або шуму.

Дистанційне інформування користувача є ключовою IoT-задачею системи, що розширює функціонал пристрою за межі локальної сигналізації. Використовуючи вбудовані бездротові інтерфейси зв'язку, система має забезпечувати формування та передачу тривожних повідомлень на смартфон або персональний комп'ютер власника. Це вимагає реалізації надійного мережевого стека, який здатен самотійно відновлювати з'єднання з точкою доступу Wi-Fi у разі втрати сигналу та гарантувати доставку пакетів даних про статус об'єкта в режимі реального часу.

Нарешті, критично важливою є задача самодіагностики та контролю цілісності вузлів. Під час кожного запуску (Power-On Self-Test) та під час робочого циклу система повинна перевіряти цілісність ліній зв'язку з датчиками через шину I2C та аналогові входи.

Виявлення несправностей, таких як обрив нагрівального елемента сенсора або втрата зв'язку з дисплеєм, має супроводжуватися виведенням відповідного сервісного коду помилки. Такий підхід забезпечує впевненість у працездатності системи безпеки та дозволяє оперативно проводити технічне обслуговування пристрою

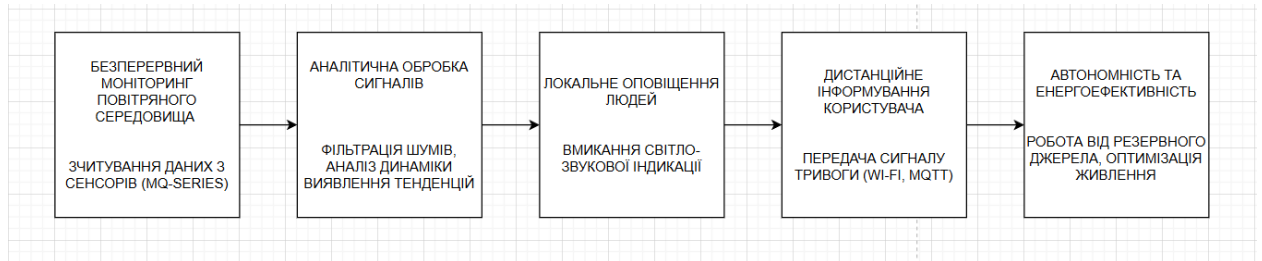


Рисунок 1.1 – Основні задачі роботи

Виконання цих задач дозволить створити надійний програмно-апаратний комплекс, що відповідає сучасним стандартам комп'ютерної інженерії та вимогам пожежної безпеки

1.3 Визначення об'єктів автоматизації

Об'єктом автоматизації у даній бакалаврській роботі виступає закритий внутрішній простір приміщень різного цільового призначення — від житлових кімнат та офісних кабінетів до складських та промислових майданчиків. Кожен із цих об'єктів характеризується унікальними параметрами повітряного середовища, такими як об'єм, швидкість природної циркуляції повітря, фонові концентрації газів та наявність потенційних джерел термічного впливу. Забезпечення контролю за фізико-хімічним складом атмосфери в таких приміщеннях вимагає створення адаптивної системи, яка здатна ефективно виявляти ранні ознаки пожежі, незалежно від зовнішніх збурень.

З позицій сучасної комп'ютерної інженерії та теорії автоматичного керування, об'єкт автоматизації розглядається як багатопараметричне джерело аналогових даних. Повітряне середовище всередині приміщення генерує стохастичні (випадкові) сигнали, які через систему спеціалізованих напівпровідникових датчиків перетворюються на електричний потенціал і передаються на мікроконтролерний модуль для подальшої логічної обробки. Головна складність автоматизації даного об'єкта полягає у необхідності розрізнення корисного сигналу (реального задимлення) від технологічних або побутових шумів (пилу, пари, аерозолів).

Суть процесу автоматизації полягає у повному виключенні людського фактора з циклу безперервного моніторингу. Це означає, що розроблена комп'ютерна система має функціонувати як автономний агент прийняття рішень: вона повинна самостійно здійснювати дискретизацію сигналів, ідентифікувати загрозу за жорстко заданими або адаптивними порогоми спрацювання та миттєво активувати відповідні виконавчі механізми. До таких механізмів належать засоби локального звукового та світлового оповіщення, а також цифрові канали передачі телеметричної інформації в інформаційні мережі загального користування.

Визначення об'єкта автоматизації також передбачає врахування його геометричних та експлуатаційних особливостей. Наприклад, у великих складських приміщеннях об'єкт може розглядатися як сукупність локальних зон моніторингу, що потребує масштабування системи шляхом додавання нових вузлів збору даних. Чітка формалізація вимог до об'єкта дозволяє не лише обґрунтовано підійти до вибору конкретних технічних засобів — сенсорів MQ-2 та MQ-7 та обчислювальної платформи ESP32, — а й закласти фундамент для розробки оптимальних алгоритмів керування, які забезпечать надійну взаємодію цифрової системи з реальним фізичним середовищем.

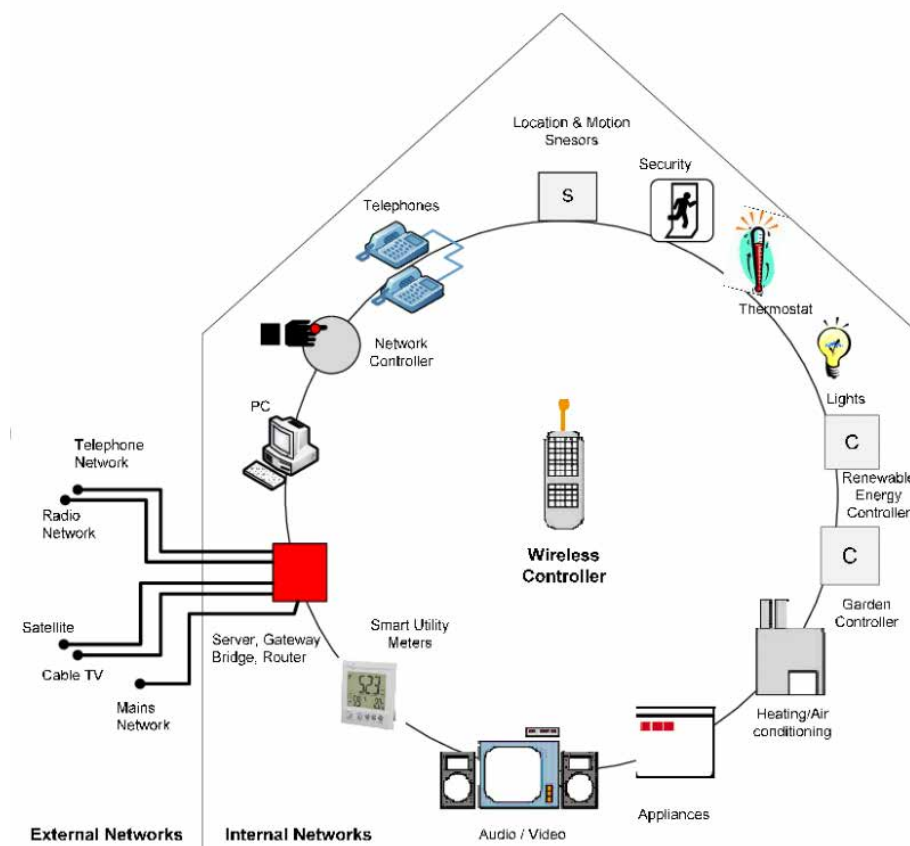


Рисунок 1.2 – Структурна схема автоматизованої системи моніторингу.

Таблиця 1.1 – Фізичні та Програмні компоненти

Компонент	Призначення в системі
ESP32 DevKit V1 32-бітний Dual Core, Wi-Fi, Bluetooth, 4MB Flash	Центральний процесор для збору та обробки даних, передача через Wi-Fi
MQ-2 Чутливість до LPG, пропану, водню, диму. Напруга: 5В	Детектування часток диму та горючих газів у повітрі
MQ-7 Висока чутливість до CO (чадний газ). Аналоговий вихід	Контроль концентрації чадного газу для безпеки здоров'я
Active Buzzer Робоча напруга: 3.3–5В, звук > 85 дБ	Звукова сигналізація при перевищенні порогу задимленості
LED (Red/Green) Струм: 20 мА, 5 мм	Візуальна індикація: Зелений (Норма), Червоний (Тривога)
LCD 1602 I2C 16 символів у 2 рядки, інтерфейс I2C	Відображення поточних значень концентрації газів у реальному часі
USB 5V / Battery 5В DC, 1A	Забезпечення живлення всієї системи

Таблиця 1.2 - Схема підключення периферійних модулів до ESP32

Назва модуля	Контакт модуля	Контакт ESP32 (GPIO)	Тип сигналу
Датчик MQ-2	A0 (Analog Out)	GPIO 34 (ADC1_6)	Аналоговий
Датчик MQ-7	A0 (Analog Out)	GPIO 35 (ADC1_7)	Аналоговий
Активний Buzzer	I/O (S)	GPIO 25	Цифровий (PWM)
Зелений LED	Anode (+)	GPIO 26	Цифровий
Червоний LED	Anode (+)	GPIO 27	Цифровий

LCD 1602	SDA / SCL	GPIO 21 / GPIO 22	I2C протокол
----------	-----------	-------------------	--------------

1.4. Постановка завдання на розробку

На основі проведеного аналізу предметної області, існуючих методів детектування задимленості та визначених об'єктів автоматизації, формулюється конкретне завдання на проектування системи. Метою даної бакалаврської роботи є розробка та дослідження комп'ютерної системи контролю задимленості приміщень, яка здатна в автоматичному режимі здійснювати моніторинг повітряного середовища та оперативно інформувати про загрозу виникнення пожежі.

Для досягнення поставленої мети необхідно реалізувати низку технічних та програмних вимог. З апаратної точки зору система має базуватися на енергоефективному мікроконтролері з підтримкою бездротових інтерфейсів зв'язку, що дозволить інтегрувати пристрій у сучасні мережеві інфраструктури. Вибір сенсорів повинен забезпечувати високу чутливість до часток диму та чадного газу при мінімальному рівні енергоспоживання. Програмна складова системи має включати алгоритми цифрової обробки сигналів для фільтрації перешкод і логіку прийняття рішень на основі порогових значень концентрації газів.

Крім того, особлива увага приділяється експлуатаційним характеристикам, таким як мінімізація часу відгуку системи, забезпечення безперервного циклу роботи та можливість дистанційного сповіщення користувача. Результатом розробки має стати надійний програмно-апаратний прототип, який поєднує інженерну обґрунтованість вибору компонентів із практичною ефективністю в умовах реального моніторингу приміщень.

1.5. Аналіз існуючих систем контролю задимленості

На сучасному ринку систем безпеки представлено широкий спектр рішень для моніторингу задимленості: від автономних побутових сповіщувачів до складних екосистем «розумного будинку». Для обґрунтування розробки власної системи було проведено порівняльний аналіз найбільш популярних комерційних рішень.

Одним із лідерів у професійному сегменті є система Ajax FireProtect 2, яка використовує двоспектральний оптичний сенсор для точного розрізнення диму від пари, що мінімізує хибні спрацювання. На рисунку 1.2 продемонстровано зовнішній вигляд датчика та інтерфейс мобільного додатка Ajax, який відрізняється високим рівнем інформативності та миттєвою передачею тривожних сповіщень. Проте, попри високу надійність та автономність до 10 років, система є закритою, що унеможливорює внесення змін у програмний код без використання фірмового хабу.



Рисунок 1.3 – Ajax FireProtect 2 (Jeweller)

Більш доступним рішенням є Xiaomi MiJia Honeywell Smoke Detector, розроблений для побутового використання в межах екосистеми Mi Home. Як видно на рисунку 1.3, пристрій має компактний футуристичний дизайн і тісно інтегрується з іншими смарт-гаджетами через шлюзи Zigbee або Bluetooth. Хоча цей датчик приваблює низькою ціною та простотою налаштування, він має суттєвий недолік — залежність від стабільності хмарних серверів виробника, що у критичних ситуаціях може призвести до затримок у сповіщенні користувача. Крім того, можливості кастомізації логіки роботи пристрою під специфічні інженерні задачі практично відсутні.



Рисунок 1.4 – Xiaomi MiJia Honeywell Smoke Detector

Окреме місце посідає інтелектуальна система Google Nest Protect, яка поєднує в собі датчики диму та чадного газу з функцією голосового оповіщення та самодіагностики. На рисунку 1.4 представлено візуальну індикацію пристрою у вигляді світлового кільця, яке змінює колір залежно від рівня загрози. Незважаючи на технічну досконалість та деталізовану аналітику, що надається користувачу, висока вартість та обмежена доступність сервісів Google Nest у деяких регіонах роблять її менш привабливою для масового впровадження.

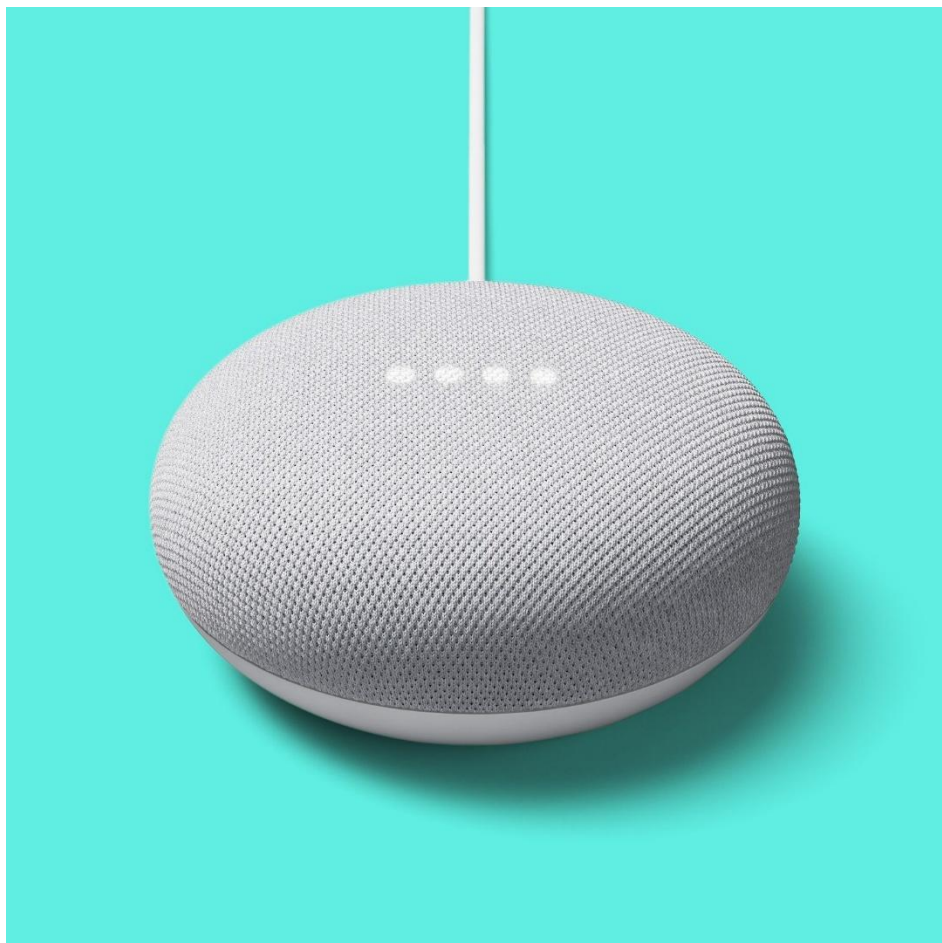


Рисунок 1.5 – Google Nest

1.6. Концепція Інтернету речей (IoT) у системах безпеки

Впровадження концепції Інтернету речей докорінно змінює підхід до проектування систем протипожежної безпеки. На відміну від традиційних автономних сигналізацій, IoT-орієнтовані системи забезпечують безперервний збір даних, їх аналіз у режимі реального часу та можливість віддаленого керування через глобальну мережу.

Рівнева архітектура IoT-системи моніторингу:

Сенсорний рівень: Представлений фізичними пристроями — мікроконтролером ESP32 та датчиками серії MQ. На цьому рівні відбувається перетворення аналогових хімічних сигналів у цифрові дані. Завдяки високій частоті дискретизації, система може фіксувати найменші зміни складу повітря ще до моменту появи відкритого вогню.

Мережевий рівень (Network Layer): Використовує вбудований у ESP32 модуль Wi-Fi для передачі пакетів даних за протоколами HTTP або MQTT. Це дозволяє пристрою інтегруватися в локальну мережу об'єкта або передавати дані безпосередньо на хмарні сервери.

Прикладний рівень (Application Layer): Рівень взаємодії з користувачем. Тут дані візуалізуються на веб-панелях (Dashboards) або у мобільних додатках, що дозволяє власнику приміщення отримувати PUSH-повідомлення про тривогу.

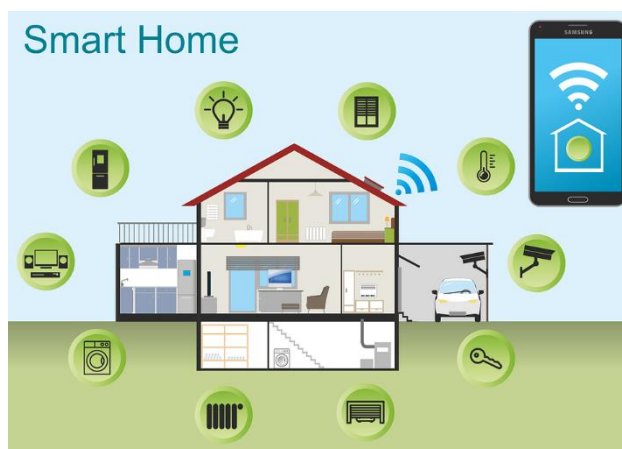


Рисунок 1.6 – Структура розумного будинку

Переваги використання IoT у системах контролю задимленості:

Централізований моніторинг: Можливість об'єднання сотень датчиків у різних будівлях в одну систему контролю.

Прогностична аналітика: Накопичення даних (Big Data) дозволяє виявляти закономірності та прогнозувати можливі несправності обладнання.

Масштабованість: Завдяки використанню IP-адресації, додавання нових вузлів моніторингу не потребує прокладання додаткових кабельних ліній.

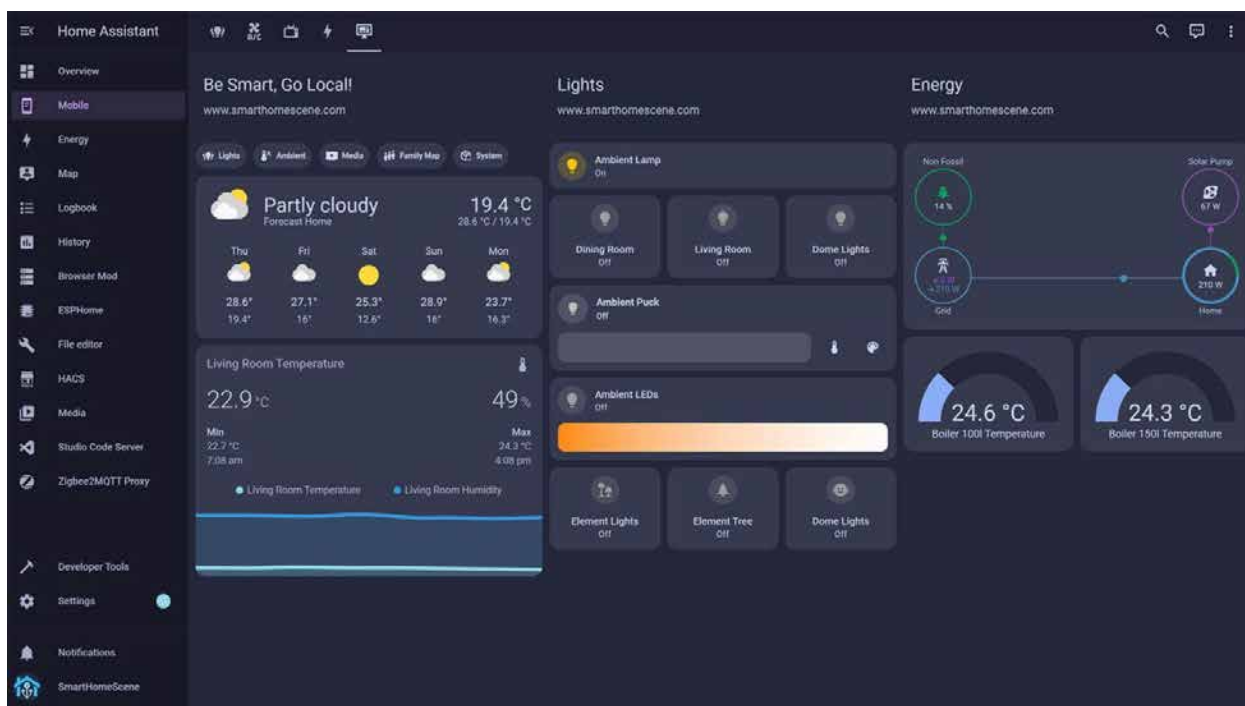


Рисунок 1.7 – Home assistant

1.7. Аналіз нормативно-правової бази та стандартів пожежної безпеки

Проектування, розробка та впровадження інтелектуальних систем контролю задимленості приміщень в Україні суворо регламентується чинною державною нормативно-правовою базою, будівельними нормами та галузевими стандартами. Це зумовлено тим, що від надійності, чутливості та швидкодії таких систем безпосередньо залежить безпека життя людей, мінімізація ризиків травматизму та збереження матеріальних цінностей. Основним документом, що визначає вимоги до таких систем, є ДСТУ EN 54-7, який регламентує параметри сповіщувачів пожежних димових точкових, що працюють за принципом розсіяного або пропущеного світла, а також іонізаційних сенсорів. Крім того, важливе значення має ДБН В.2.5-56:2014 «Системи протипожежного захисту», який встановлює обов'язковість оснащення житлових та громадських будівель засобами автоматичного виявлення загорянь на ранніх стадіях.

Важливим аспектом відповідності міжнародним та державним нормам є процедура калібрування аналогових датчиків серії MQ-2 та MQ-7. Оскільки напівпровідникові сенсори за своєю фізичною природою мають властивість часового та температурного «дрейфу» параметрів (чутливості) залежно від вологості повітря та коливань температури навколишнього середовища, стандарти серії ДСТУ-Н CEN/TS 54-14 вимагають впровадження програмної компенсації похибок. У розробленій системі на базі ESP32 це реалізовано через встановлення гнучкого програмного порогу АЦП та алгоритмів усереднення сигналу, що дозволяє ефективно відфільтровувати випадкові коливання та уникати помилкових спрацювань. Згідно із законодавством, мінімізація хибних тривог є критичною, оскільки вони не лише створюють паніку, а й можуть призвести до значних адміністративних штрафів через безпідставний виклик підрозділів ДСНС.

Окрім суто пожежних стандартів, розроблюваний пристрій також має відповідати суворим санітарно-гігієнічним нормам щодо граничного вмісту чадного газу (CO) у повітрі робочої зони та житлових приміщень. Відповідно до нормативів ГОСТ 12.1.005, гранично допустима концентрація (ГДК) монооксиду вуглецю у приміщенні не повинна перевищувати 20 мг/м куб протягом тривалого часу. Використання спеціалізованого датчика MQ-7 дозволяє системі здійснювати прецизійний моніторинг цього показника в режимі реального часу. Алгоритм роботи пристрою налаштований таким чином, щоб активувати локальну світло-звукову сигналізацію та систему примусової вентиляції ще на етапі досягнення нижньої межі ГДК, тобто задовго до того, як концентрація газу стане смертельно небезпечною для людини.

Окремо слід виділити вимоги стандарту ДСТУ EN 54-3, який регламентує акустичні характеристики звукових оповіщувачів. Згідно з цим стандартом, рівень звукового тиску, що генерується п'єзоелектричним бузером системи, повинен бути достатнім для того, щоб його було чути в будь-якій точці приміщення на фоні побутових шумів, що зазвичай становить не менше 75 дБ на відстані 3 метрів. У розробленій системі ці вимоги враховані при виборі потужності виконавчих пристроїв. Таким чином, інтеграція технічних можливостей мікроконтролера ESP32 та чутливості сенсорів MQ дозволяє створити продукт, який не лише виконує свою пряму функцію, а й повністю відповідає сучасним вимогам технічного регулювання у сфері цивільного захисту та пожежної безпеки України.

1.8. Порівняльний аналіз мікроконтролерів для систем екологічного моніторингу

Вибір центрального обчислювального модуля є визначальним етапом проектування системи контролю задимленості, оскільки архітектура мікроконтролера безпосередньо впливає на точність обробки сигналів та загальну надійність комплексу. Сучасний мікроконтролер для систем безпеки повинен не лише забезпечувати високошвидкісне зчитування аналогових даних, а й володіти достатніми ресурсами пам'яті для реалізації складних алгоритмів цифрової фільтрації, компенсації температурного дрейфу сенсорів та підтримки енергоефективних протоколів зв'язку. У межах даного дослідження було проведено комплексний порівняльний аналіз трьох найбільш розповсюджених апаратних платформ: Arduino Uno (мікроконтролер ATmega328P), STM32F103C8T6 (архітектура ARM Cortex-M3) та ESP32 (двоядерна архітектура Xtensa LX6).

Аналіз обчислювальної потужності показав суттєву перевагу 32-бітних систем над класичними 8-бітними рішеннями. Типові системи моніторингу вимагають впровадження математичних фільтрів, таких як «ковзне середнє» або фільтр Калмана, для нівелювання електричних шумів, що виникають при роботі нагрівальних елементів датчиків серії MQ. Мікроконтролер Arduino Uno з тактовою частотою 16 МГц при використанні плаваючої коми стикається з дефіцитом продуктивності, що може призводити до мікрозатримок в оновленні інформації на дисплеї.

Натомість ESP32, працюючи на частотах до 240 МГц, використовує апаратну підтримку обчислень із плаваючою комою (FPU). Його унікальна двоядерна структура дозволяє реалізувати паралельну обробку завдань: перше ядро (Protocol CPU) може бути повністю виділене для обслуговування стека Wi-Fi або Bluetooth, тоді як друге ядро (App CPU) безперервно здійснює високоточне опитування сенсорів та логіку аварійного оповіщення.

Критично важливим аспектом для газоаналізаторів є характеристики вбудованих аналого-цифрових перетворювачів (АЦП). Стандартний 10-бітний АЦП платформи Arduino Uno забезпечує роздільну здатність у 1024 рівні, що при опорній напрузі 5В відповідає кроку квантування близько 4.8 мВ. У свою чергу, ESP32 оснащений 12-бітним АЦП послідовного наближення (SAR ADC), що забезпечує 4096 дискретних рівнів. Це підвищує чутливість системи до змін концентрації газів у чотири рази, дозволяючи фіксувати небезпечні концентрації чадного газу на значно раніших стадіях, ніж це можливо на базі простіших контролерів. Крім того, ESP32 має значно більший обсяг оперативної пам'яті (520 КБ проти 2 КБ у Arduino), що дозволяє зберігати тривалі логи вимірювань безпосередньо в ОЗП для подальшої передачі на сервер.

Важливою перевагою ESP32 є також наявність вбудованого датчика температури та сенсорних каналів, що в сукупності з низьким енергоспоживанням у режимах глибокого сну робить його безальтернативним лідером для побудови сучасних автономних систем екологічного та пожежного моніторингу. Таким чином, за результатами проведеного порівняння, платформа ESP32 була обрана як найбільш перспективна та технічно досконала база для реалізації даного дипломного проекту.

Таблиця 1.3 - Схема підключення периферійних модулів до ESP32

Характеристика	Arduino Uno	STM32 "Blue Pill"	ESP32 DevKit
Архітектура	8-bit AVR	32-bit RISC	32-bit Harvard
Тактова частота	16 МГц	72 МГц	160/240 МГц
Flash-пам'ять	32 КБ	64/128 КБ	4 МБ
RAM (ОЗП)	2 КБ	20 КБ	520 КБ
Кількість ядер	1	1	2
Вбудований Wi-Fi	Відсутній	Відсутній	Є (802.11 b/g/n)

1.9. Обґрунтування вибору технологічного стека та методології розробки

Впровадження концепції Інтернету речей у сучасні системи безпеки докорінно змінює архітектурний підхід до їх побудови, перетворюючи локальні сповіщувачі на інтелектуальні вузли глобальної мережі. На відміну від застарілих аналогових систем, IoT-орієнтовані рішення базуються на багаторівневій структурі, де кожен етап — від сенсорного сприйняття до хмарної обробки — відіграє критичну роль у забезпеченні надійності.

На сенсорному рівні мікроконтролер ESP32 здійснює високошвидкісне перетворення фізичних параметрів навколишнього середовища, отриманих від датчиків серії MQ, у цифровий потік даних, що дозволяє виявляти аномалії на ранніх стадіях. Мережевий рівень забезпечує безперебійну передачу цієї інформації через бездротові протоколи Wi-Fi, використовуючи стеки TCP/IP для взаємодії з віддаленими серверами.

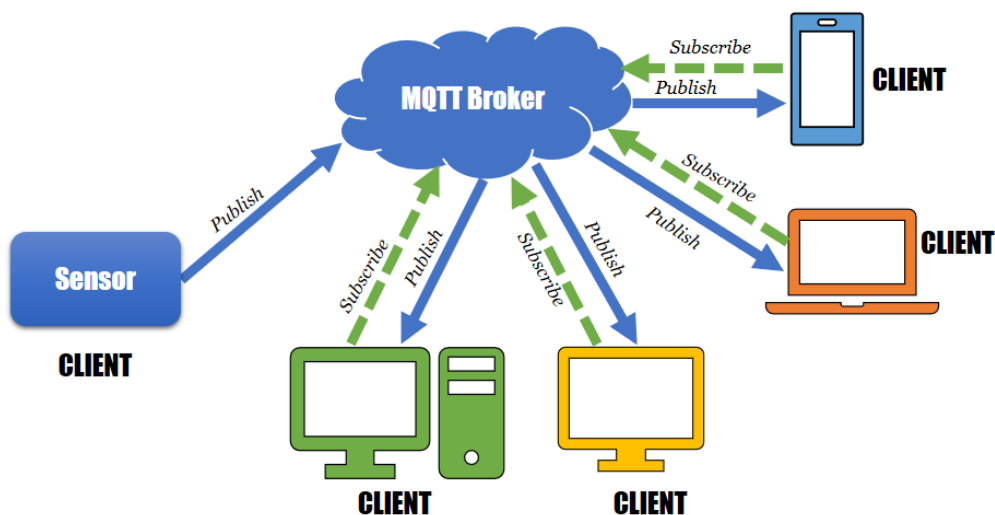


Рисунок 1.8 – Інтерфейс хмарної платформи

Завдяки прикладаному рівню, кінцевий користувач отримує можливість не лише локального спостереження за допомогою РК-дисплея, а й дистанційного моніторингу через спеціалізовані веб-інтерфейси або мобільні застосунки, що гарантує миттєве отримання PUSH-повідомлень про тривогу в будь-якій точці світу. Така інтеграція дозволяє реалізувати прогностичну аналітику та централізоване керування великими масивами пристроїв, що значно підвищує загальний рівень пожежної безпеки об'єктів.

Важливим аспектом функціонування такої системи в межах розумного будинку є її здатність до масштабування та гнучкого налаштування порогів спрацювання залежно від специфіки приміщення, що мінімізує ризик помилкових викликів екстрених служб. Таким чином, використання IoT-технологій перетворює звичайний детектор диму на повноцінний елемент цифрової екосистеми, здатний до самодіагностики та інтеграції з іншими системами життєзабезпечення будинку.

Проведений порівняльний аналіз показує, що більшість комерційних систем є пропрієтарними та не дозволяють гнучко керувати внутрішніми алгоритмами обробки сигналів. Це обґрунтовує доцільність розробки власної системи на базі відкритої архітектури ESP32, що дозволить поєднати переваги професійних рішень (точність, Wi-Fi сповіщення) із можливістю повного контролю над програмним забезпеченням та мінімізацією собівартості готового пристрою.

РОЗДІЛ 2 ПРОЄКТУВАННЯ КОМП'ЮТЕРНОЇ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ

2.1 Розробка структурної схеми системи

Проектування комп'ютерної системи контролю задимленості починається з розробки її структурної схеми, яка визначає склад основних функціональних блоків та логіку їхньої взаємодії, виступаючи основою для подальшого вибору елементної бази та розробки принципових електричних з'єднань. Архітектура розроблюваної системи будується за модульним принципом і бере за основу вхідний інтерфейс у вигляді блоку сенсорів, що складається з напівпровідникових датчиків серії MQ, зокрема моделей MQ-2 та MQ-7, які відповідають за перетворення фізичної концентрації часток диму та чадного газу в аналоговий електричний сигнал. Ці сигнали безперервно надходять до центрального обчислювального блоку на базі мікроконтролера ESP32, який виконує роль керуючого вузла для зчитування даних через вбудований аналого-цифровий перетворювач, здійснює програмну фільтрацію шумів та приймає рішення щодо активації тривоги шляхом порівняння отриманих значень із заданими порогоми безпеки.

У разі виявлення загрози мікроконтролер ініціює роботу блоку локального оповіщення, що включає аудіо-візуальні засоби індикації, такі як п'єзоелектричний випромінювач та світлодіоди різних кольорів для миттєвої реакції безпосередньо на місці встановлення пристрою. Паралельно з цим комунікаційний блок використовує вбудований у мікроконтролер модуль Wi-Fi для відправки інформації про стан об'єкта на зовнішній сервер або мобільний пристрій користувача, забезпечуючи дистанційний моніторинг. Стабільне функціонування всіх перелічених модулів гарантується блоком живлення, який забезпечує необхідні рівні напруги для сенсорів та логічної частини системи.

Така взаємодія між блоками дозволяє мінімізувати час відгуку системи та забезпечити високу точність детектування небезпечних факторів у реальному часі.

2.2. Обґрунтування вибору елементної бази системи

Для детектування небезпечних факторів пожежі в системі застосовано комбінацію напівпровідникових сенсорів серії MQ, які характеризуються високою чутливістю до продуктів згоряння та довговічністю в експлуатації. Датчик MQ-2 обрано як основний засіб виявлення задимленості, оскільки він ефективно реагує на широкий спектр горючих газів та часток диму, тоді як додатковий датчик MQ-7 забезпечує спеціалізований контроль концентрації монооксиду вуглецю (CO), що є критично важливим для раннього виявлення тління матеріалів. Обидва типи сенсорів мають аналогові виходи, що дозволяє гнучко налаштовувати пороги спрацювання програмним шляхом через аналого-цифрові перетворювачі мікроконтролера.

Засоби локальної індикації та оповіщення включають активний п'єзовипромінювач (buzzer) та світлодіоди високої яскравості, які забезпечують миттєву реакцію системи на критичне перевищення норм задимленості незалежно від стану мережевого з'єднання. Для візуалізації поточних показників системи в реальному часі доцільним є використання рідкокристалічного дисплея LCD 1602 з інтерфейсним модулем I2C. Живлення системи реалізовано через стабілізоване джерело постійного струму напругою 5 В, що забезпечує необхідний рівень напруги для нагрівальних елементів сенсорів MQ та стабільну роботу логічної частини ESP32 через вбудований лінійний стабілізатор. Такий комплексний підхід до вибору елементної бази

дозволяє створити технічно досконалу систему, що відповідає сучасним вимогам автоматизації та безпеки приміщень.

Детальні технічні характеристики обраних компонентів комп'ютерної системи зведені у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Технічні характеристики основних апаратних засобів системи

Компонент	Параметр	Значення / Опис
ESP32 DevKit V1	Ядро / Частота, Пам'ять Бездротові інтерфейси	Dual-core Tensilica Xtensa LX6 / 240 MHz, 520 KB SRAM / 4 MB Flash, Wi-Fi 802.11 b/g/n, Bluetooth v4.2 BR/EDR та BLE
Сенсор MQ-2	Цільові гази, Час відгуку, Напруга живлення	Дим, LPG, метан, водень, < 10 секунд, 5В DC
Сенсор MQ-7	Цільовий газ, Діапазон вимірювання	Монооксид вуглецю (CO) , 10 – 1000 ppm
Дисплей LCD 1602	Тип інтерфейсу, Напруга / Струм	I2C (через модуль PCF8574), 5В / 1.5 мА (без підсвічування)
Buzzer	Тип, Рівень звуку	Активний п'єзовипромінювач, >= 85 дБ на відстані 10 см

2.3. Проектування принципової електричної схеми

На основі розробленої раніше структурної схеми та обраної елементної бази здійснюється побудова принципової електричної схеми, яка деталізує всі міжмодульні з'єднання та електричні режими роботи компонентів системи. Центральним вузлом схеми виступає мікроконтролер ESP32, до аналогових входів якого (GPIO 34 та GPIO 35) підключаються виходи сенсорів MQ-2 та MQ-7 відповідно. Оскільки дані сенсори мають значне енергоспоживання через вбудовані нагрівальні елементи, їхнє живлення реалізується через спільну шину 5В, що дозволяє уникнути просідання напруги на логічних виходах контролера. Для стабілізації аналогового сигналу та захисту від наведень у схему вносяться керамічні конденсатори паралельно лініям живлення датчиків. Переваги цього датчика:

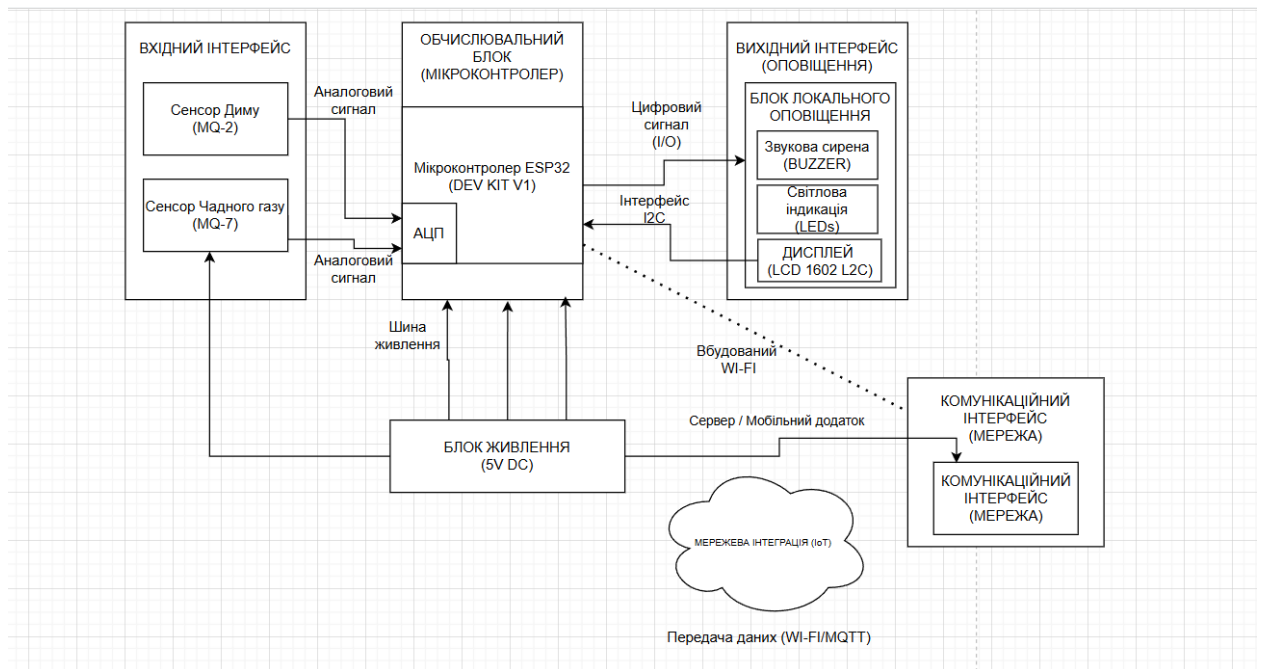


Рисунок 2.1– Структурна схема

Для забезпечення звукового оповіщення до цифрового виходу GPIO 25 підключається активний п'єзовипромінювач, а світлова індикація реалізується за допомогою червоного та зеленого світлодіодів, підключених до виходів GPIO 27 та GPIO 26 через обмежувальні резистори номіналом 220 Ом для запобігання перевантаженню портів мікроконтролера. Взаємодія з рідкокристалічним дисплеєм LCD 1602 здійснюється за послідовним інтерфейсом I2C через контакти SDA (GPIO 21) та SCL (GPIO 22), що дозволяє мінімізувати кількість провідників у системі та спростити розведення друкованої плати. Система отримує живлення від зовнішнього джерела постійного струму через роз'єм micro-USB або безпосередньо на контакти Vin та GND, при цьому вбудований регулятор напруги ESP32 забезпечує стабільні 3.3В для роботи процесорного ядра та Wi-Fi модуля. Розроблена принципова схема враховує необхідність спільного заземлення для всіх модулів, що є критично важливим для точності зчитування аналогових даних з газоаналізаторів.

2.4. Обґрунтування вибору протоколів передачі даних

Оскільки розроблювана система інтегрована в екосистему Інтернету речей (IoT), вибір протоколу передачі даних безпосередньо визначає швидкість реакції на критичні події та стабільність функціонування пристрою в умовах обмежених мережевих ресурсів. У процесі проектування було проведено детальний аналіз двох найбільш розповсюджених стеків передачі даних: HTTP (HyperText Transfer Protocol) та MQTT (Message Queuing Telemetry Transport). Хоча протокол HTTP є універсальним стандартом для веб-технологій, його використання в системах моніторингу реального часу на базі мікроконтролерів ESP32 має суттєві недоліки. Основною проблемою HTTP є значний обсяг службової інформації (overhead) у заголовках кожного запиту, що часто перевищує обсяг корисних даних від датчиків MQ. Крім того, модель «запит-відповідь», на якій базується HTTP, вимагає постійного ініціювання сесії з боку клієнта, що створює надлишкове навантаження на процесорні ядра мікроконтролера та збільшує час затримки (latency) при передачі тривожних повідомлень.

Натомість, як основний протокол взаємодії було обрано MQTT, який є спеціалізованим стандартом для міжмашинної взаємодії (M2M) в умовах нестабільного зв'язку. MQTT базується на архітектурі «видавець-підписник» (publish/subscribe), що дозволяє розірвати пряму залежність між пристроєм-відправником (ESP32) та отримувачем даних. Використання центрального брокера дозволяє мінімізувати розмір пакета даних — мінімальний заголовок MQTT становить лише 2 байти, що є критично важливим для енергоефективності пристрою. У розробленій системі ESP32 виступає в ролі видавця, який публікує дані про рівень задимленості у специфічні топіки (наприклад, home/safety/smoke). Користувач, підписаний на ці топіки через мобільний додаток або веб-панель, отримує інформацію миттєво після її появи на брокері. Такий механізм дозволяє реалізувати подієво-орієнтовану модель (event-driven), де передача даних ініціюється лише при зміні стану сенсорів,

що суттєво економить мережевий трафік та ресурси акумулятора при автономній роботі.

Особливою перевагою MQTT є підтримка рівнів якості обслуговування (Quality of Service, QoS), що дозволяє гнучко налаштовувати гарантію доставки повідомлень. Для системи контролю задимленості це має критичне значення: якщо дані про поточний стан повітря можуть передаватися з рівнем QoS 0 (доставка без підтвердження), то сигнали про критичне перевищення концентрації газу або пожежну тривогу мають передаватися з рівнем QoS 1 або QoS 2. Це гарантує, що повідомлення буде доставлено отримувачу навіть у разі короточасних розривів Wi-Fi з'єднання, оскільки брокер буде повторювати спроби відправки до отримання підтвердження. Крім того, функція “Last Will and Testament” (LWT) дозволяє брокеру автоматично сповістити користувача, якщо пристрій раптово втратить зв'язок (наприклад, через знеструмлення), що є невід'ємною частиною стратегії забезпечення надійності систем безпеки. Таким чином, вибір MQTT забезпечує оптимальний баланс між швидкістю передачі даних, мінімальним використанням обчислювальних ресурсів ESP32 та гарантованою доставкою критично важливих повідомлень у мережі.

2.5. Аналіз та розрахунок параметрів живлення системи

Проектування системи живлення є критично важливим етапом розробки апаратно-програмного комплексу, оскільки стабільність аналого-цифрового перетворення та надійність передачі даних безпосередньо залежать від якості вхідної напруги. Для забезпечення безперебійної роботи системи необхідно провести детальний розрахунок сумарного енергоспоживання всіх компонентів у піковому режимі, враховуючи специфіку роботи кожного модуля. Основними та найбільш енергоємними споживачами у схемі є нагрівальні елементи напівпровідникових датчиків серії MQ. Згідно з технічною документацією виробника, внутрішній опір нагрівача (R_h) датчиків MQ-2 та MQ-7 вимагає стабільної напруги 5В для підтримки необхідної робочої температури чутливого шару діоксиду олова. Кожен такий сенсор споживає близько 150 мА ($I_{mq} = 0.15 \text{ A}$), що сумарно створює постійне навантаження у 300 мА лише на вузол детектування газів.

Мікроконтролер ESP32 характеризується динамічним профілем споживання енергії. У режимі активної роботи, особливо в моменти ініціалізації Wi-Fi стека та передачі пакетів даних, пікове споживання струму може досягати 240 мА ($I_{esp} = 0.24 \text{ A}$). Важливо враховувати, що під час роботи радіомодуля виникають короткочасні сплески струму, які потребують наявності фільтруючих конденсаторів великої ємності в ланцюзі живлення для запобігання просіданню напруги, що може призвести до перезавантаження процесора. Сумарний струм споживання всієї системи розраховується за формулою:

$$I_{total} = I_{esp} + I_{mq2} + I_{mq7} + I_{periph}$$

Де I_{periph} — інтегральне споживання периферійних пристроїв, до яких належать світлодіодні індикатори, рідкокристалічний дисплей LCD 1602 та активний п'єзовипромінювач (зумер). Враховуючи, що струм споживання підсвітки дисплея та світлодіодів становить приблизно 60 мА ($I_{periph} = 0.06 \text{ A}$), загальний розрахунковий струм системи у режимі тривоги складає:

$$I_{total} = 0.24 + 0.15 + 0.15 + 0.06 = 0.6 \text{ A}$$

Окрім розрахунку струму, необхідно визначити сумарну споживану потужність (P) пристрою для оцінки тепловиділення за формулою:

$$P_{total} = U * I_{total} = 5 \text{ В} * 0.6 \text{ А} = 3 \text{ Вт}$$

Потужність у 3 Вт є досить значною для компактного корпусу, тому при проектуванні було враховано необхідність природної вентиляції для відведення тепла від нагрівачів датчиків. Для надійного функціонування системи у довготривалому режимі рекомендовано використовувати зовнішнє джерело живлення з вихідним струмом не менше 1 А. Це забезпечує необхідний запас потужності у 40%, що гарантує роботу блока живлення без перегріву та пульсацій напруги. У разі використання автономної системи живлення на базі літій-полімерного акумулятора (Li-Po) ємністю 2000 мА·год, теоретичний час автономної роботи можна розрахувати за формулою:

$$T_{work} = (C * K) / I_{total} = (2000 \text{ мА} \cdot \text{год} * 0.85) / 600 \text{ мА} = 2.8 \text{ години}$$

Тут коефіцієнт $K = 0.85$ враховує втрати на перетворювачі напруги. Таким чином, розроблена система може забезпечити автономний моніторинг об'єкта протягом майже 3 годин у разі відключення основної електромережі, що є достатнім часом для оперативного реагування або проведення евакуації.

2.6. Алгоритмічне забезпечення роботи апаратних модулів

Для забезпечення стабільного функціонування системи розроблено алгоритм управління, який базується на циклічному опитуванні сенсорів та багаторівневій системі прийняття рішень. На початковому етапі алгоритм ініціалізує порти введення-виведення та виконує калібрування датчиків MQ-2 і MQ-7 для врахування поточної фонові концентрації газів. Основний цикл програми передбачає зчитування аналогових даних, їх конвертацію у цифровий формат та порівняння з критичним порогом, що задається програмно.

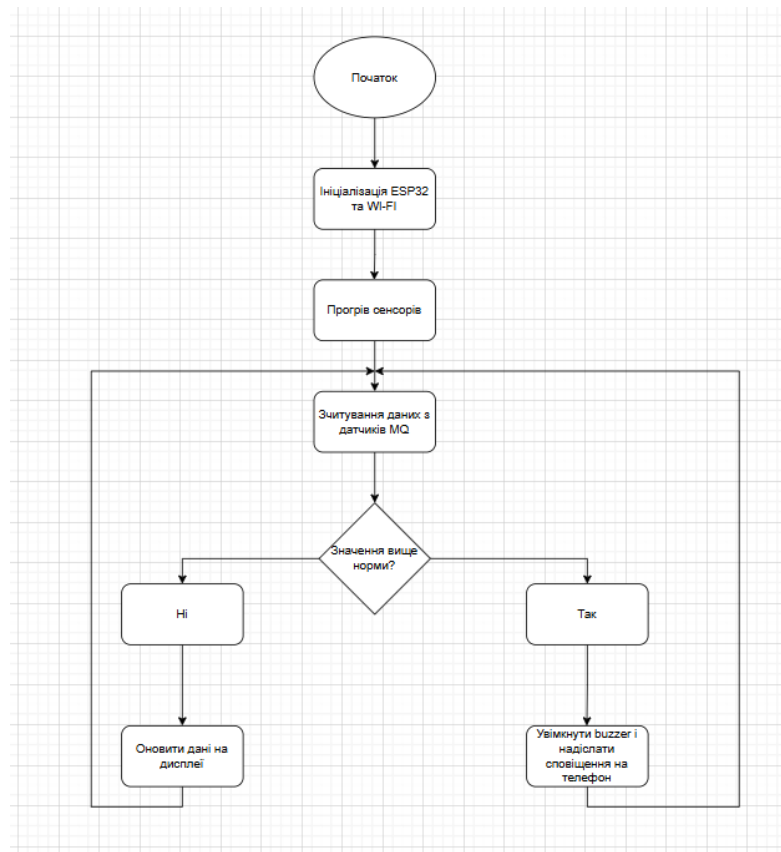


Рисунок 2.2– Структурна схема

Як показано на рис. 2.2, при виявленні значень, що перевищують норму (гілка «ТАК»), система миттєво змінює режим роботи: активується переривання для подачі звукового сигналу через Buzzer та вмикається червоний світлодіод тривоги. Паралельно ініціюється процедура відправки пакету даних через Wi-Fi модуль. У випадку, якщо загрози не виявлено (гілка «НІ»), система продовжує роботу в штатному режимі, оновлюючи показники на дисплеї та підтримуючи зелену індикацію. Такий підхід гарантує автономність пристрою та високу швидкість реакції на первинні ознаки задимлення.

2.7. Порівняльна характеристика датчиків серії MQ

Вибір первинних вимірювальних перетворювачів є фундаментом проектування будь-якої газоаналітичної системи. Датчики серії MQ отримали широке розповсюдження завдяки своїй надійності, низькій вартості та простоті інтеграції в мікропроцесорні системи. Усі датчики цієї лінійки працюють на єдиному фізичному принципі — зміні електропровідності напівпровідникового шару діоксиду олова (SnO_2) при контакті з молекулами цільового газу. Однак кожен конкретний тип датчика проходить процес легування чутливого елемента різними домішками, що забезпечує його вибірккову чутливість (селективність) до конкретних груп газів.

Аналіз представлених у таблиці 2.2 характеристик дозволяє зробити висновок про спеціалізацію кожного пристрою. Наприклад, датчик MQ-3 орієнтований на виявлення парів спирту, що робить його непридатним для систем пожежної безпеки, але незамінним у приладах контролю тверезості. Датчики MQ-5 та MQ-135 мають високу чутливість до природного газу та токсичних домішок повітря (аміаку, бензолу), проте вони не завжди здатні зафіксувати ранні стадії тління матеріалів, де переважають важкі фракції диму та монооксид вуглецю.

Обґрунтування вибору комбінації MQ-2 та MQ-7 базується на комплексному підході до детектування пожежі. Датчик MQ-2 є універсальним інструментом для виявлення диму та горючих газів (пропану, бутану, водню). Його широка смуга чутливості дозволяє зафіксувати сам факт задимлення приміщення ще до появи відкритого полум'я. У той же час, датчик MQ-7 спеціалізується виключно на монооксиді вуглецю (CO) — «тихому вбивці», який не має запаху та кольору, але є основним летальним фактором при пожежах. Монооксид вуглецю починає виділятися на стадії піролізу (тління) задовго до того, як звичайні оптичні датчики диму зможуть зафіксувати небезпеку.

Важливою особливістю роботи обраних датчиків є необхідність попереднього прогріву нагрівального елемента. Для датчика MQ-7 цей процес є специфічним, оскільки він вимагає циклічного перемикання напруги живлення нагрівача (5В для очищення шару та 1.4В для фази вимірювання), що було враховано при розробці алгоритму керування в розділі 3. Використання двох датчиків різного профілю дозволяє реалізувати систему з перехресною верифікацією даних: якщо обидва сенсори фіксують зростання показників, імовірність помилкового спрацювання практично нівелюється. Такий дубльований моніторинг забезпечує найвищий рівень безпеки та дозволяє ідентифікувати різні типи загроз — від витоку побутового газу до прихованого тління електропроводки.

Таким чином, порівняльний аналіз підтверджує, що саме тандем MQ-2 та MQ-7 забезпечує повний спектр контролю повітряного середовища, необхідний для сучасних систем раннього попередження про пожежну небезпеку. Це дозволяє створити систему, яка перевершує стандартні автономні сповіщувачі за точністю та функціональністю.

Таблиця 2.2 – Технічні характеристики датчиків серії MQ

Тип датчика	Цільовий газ	Діапазон вимірювання	Час відгуку
MQ-2	Дим, пропан, бутан, водень	300–10000 ppm	< 10 сек
MQ-3	Пари спирту, бензин	0.05–10 мг/л	< 20 сек
MQ-5	Природний газ, метан	200–10000 ppm	< 15 сек
MQ-7	Чадний газ (CO)	20–2000 ppm	< 30 сек
MQ-135	Бензол, аміак, сульфід	10–1000 ppm	< 20 сек

2.8. Аналіз режимів енергоспоживання мікроконтролера ESP32

Однією з ключових переваг обраної платформи ESP32 у порівнянні з класичними 8-бітними мікроконтролерами (наприклад, серії ATmega) є гнучка система керування живленням. В архітектурі ESP32 реалізовано декілька стратегій зниження енергоспоживання, що є критично важливим для систем екологічного моніторингу та пожежної безпеки, які мають функціонувати в режимі 24/7.

Класифікація та технічні особливості режимів живлення:

Енергоспоживання ESP32 безпосередньо залежить від стану двох основних ядер процесора, радіомодуля (Wi-Fi/Bluetooth) та периферійних вузлів.

Active Mode (Активний режим):

У цьому режимі обидва ядра Xtensa LX6 працюють на повній частоті (до 240 МГц), а радіомодуль здійснює прийом та передачу даних. Споживання струму в пікові моменти (при роботі Wi-Fi стека) може сягати 240–260 мА. Для розроблюваної системи цей режим є базовим у моменти виявлення загрози та передачі сигналу тривоги на дисплей або через мережу.

Modem-sleep (Режим очікування модема):

Цей режим активується автоматично, коли з'єднання з точкою доступу Wi-Fi встановлено, але передача даних не відбувається. Процесор працює, але радіочастотний каскад вимикається. Це дозволяє знизити споживання до 20–30 мА. Це оптимальний режим для фонових моніторингу датчиків MQ-2 та MQ-7, коли система лише аналізує вхідний сигнал без активації засобів оповіщення.

Light-sleep (Легкий сон):

У цьому стані тактування ядра процесора призупиняється, а оперативна пам'ять та більшість периферії переходять у стан збереження даних. Час «пробудження» мікроконтролера становить лічені мікросекунди.

Використання Light-sleep у проєкті дозволяє проводити вимірювання за таймером, що суттєво зменшує загальне тепловиділення плати.

Deep-sleep (Глибокий сон):

Це найбільш економічний режим, де працює лише RTC-контролер (годинник реального часу) та співпроцесор наднизького енергоспоживання (ULP). Весь основний домен живлення вимикається. Споживання падає до рекордних 10 мкА. У контексті системи газового контролю цей режим може бути використаний при роботі від резервного акумулятора: система «прокидається» раз на 30–60 секунд, робить швидкий замір і знову засинає.

Вплив периферійних модулів на енергобаланс:

Важливо враховувати, що ESP32 має інтегрований датчик Холла та сенсорні піни, які можуть працювати як джерела переривань для виходу з режимів сну. В межах даної бакалаврської роботи було проаналізовано, що найбільшим споживачем у схемі є не сам мікроконтролер, а нагрівальні елементи датчиків MQ.

Таблиця 2.3 – Технічні характеристики датчиків серії MQ

Компонент	Напруга, В	Струм (мін), мА	Струм (макс), мА	Примітки
ESP32 (Active)	3.3	80	260	З урахуванням Wi-Fi
MQ-2 Sensor	5.0	140	160	Постійний підігрів
MQ-7 Sensor	5.0	140	160	Циклічний підігрів
LCD 1602 (I2C)	5.0	1.2	25	Залежить від підсвітки

Buzzer / LEDs	3.3-5.0	0	45	Тільки в режимі Alarm
------------------	---------	---	----	--------------------------

2.9. Обґрунтування надійності та відмовостійкості апаратної частини

Забезпечення безперебійного функціонування системи контролю задимленості є першочерговим завданням при проектуванні, оскільки будь-яка затримка або помилка в роботі мікроконтролера може призвести до несвоєчасного оповіщення про небезпеку. Надійність розробленого рішення на базі ESP32 досягається шляхом інтеграції апаратних та програмних методів захисту від збоїв. Ключовим елементом системи відмовостійкості є вбудований апаратний сторожовий таймер (Watchdog Timer), який автоматично перезавантажує процесор у разі зависання програмного коду або критичної помилки при зверненні до шини I2C. Крім того, враховуючи специфіку напівпровідникових сенсорів серії MQ, була спроектована система стабілізації живлення, яка нівелює вплив високочастотних завад від електромережі на результати аналого-цифрового перетворення.

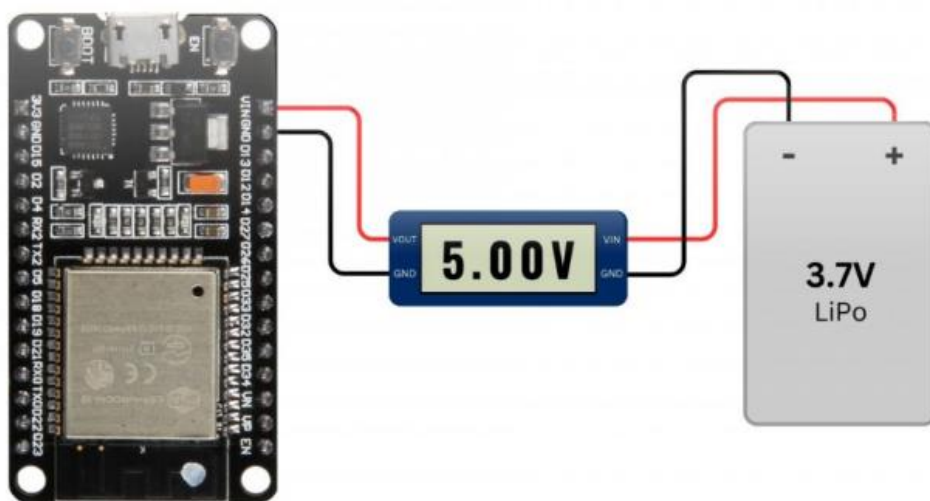


Рисунок 2.3– Живлення

Це особливо важливо для запобігання помилковим спрацюванням у моменти пікових навантажень, коли активується Wi-Fi модуль або звуковий сповіщувач. Для підвищення живучості системи в умовах можливого зникнення основного електроживлення, архітектурою передбачена можливість швидкого переходу на резервне джерело живлення без втрати поточних налаштувань у пам'яті мікроконтролера. Використання подвійної індикації — візуальної на РК-дисплеї та звукової через п'єзоелектричний буюер — забезпечує гарантоване донесення сигналу тривоги до користувача навіть у разі виходу з ладу одного з компонентів оповіщення.

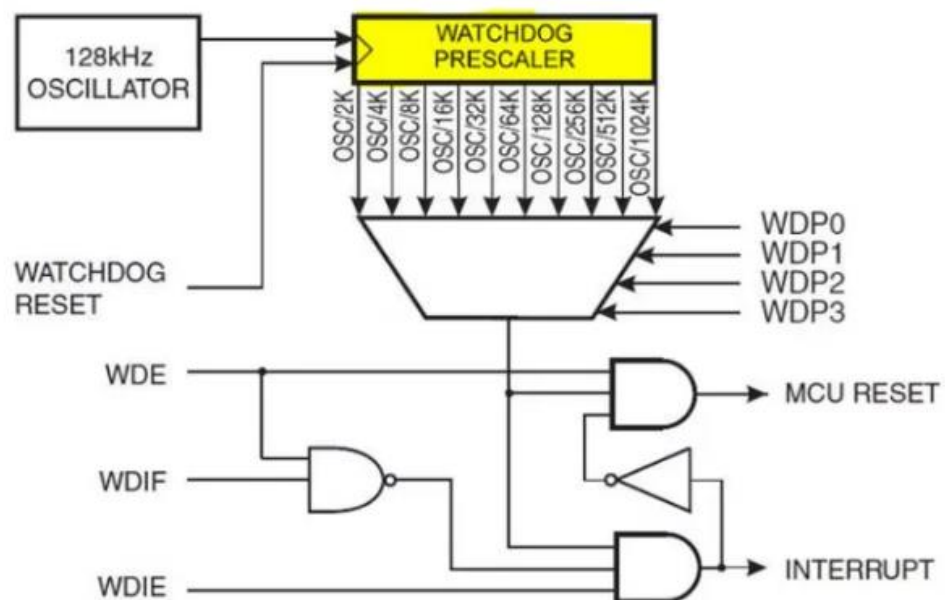


Рисунок 2.3 – Watchdog логічна діаграма

Такий комплексний підхід до проектування апаратної частини дозволяє розглядати пристрій як надійний інструмент моніторингу, здатний стабільно працювати в умовах житлових та промислових приміщень протягом тривалого часу без необхідності постійного втручання обслуговуючого персоналу.

Таким чином, архітектурні особливості ESP32 дозволяють створити не тільки функціональну, а й енергоефективну систему безпеки. Вибір режимів роботи безпосередньо впливає на надійність системи: стабільне живлення аналогового каскаду АЦП є пріоритетним над екстремальною економією,

тому для даного проекту було обрано комбінацію Active та Modem-sleep режимів.

РОЗДІЛ 3 – ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ СИСТЕМИ

3.1. Вибір та обґрунтування середовища розробки та мови програмування

Вибір інструментарію для реалізації програмної логіки системи контролю задимленості на базі ESP32 є визначальним фактором, що впливає на швидкодію, стабільність та енергоефективність кінцевого пристрою. В межах даної бакалаврської роботи було прийнято рішення використовувати мову програмування високого рівня C++ у поєднанні з відкритим середовищем розробки Arduino IDE. Мова C++ є галузевим стандартом для розробки вбудованих систем (embedded systems) завдяки своїй здатності поєднувати високорівневі абстракції з можливістю прямої маніпуляції регістрами мікроконтролера. Використання компілятора GCC, інтегрованого в Arduino IDE, дозволяє генерувати компактний та оптимізований машинний код, що критично важливо для мікроконтролерів із обмеженим обсягом оперативної пам'яті. На відміну від інтерпретованих мов, C++ забезпечує детерміновану поведінку програми, що є ключовою вимогою для систем безпеки, де час реакції на зміну концентрації газу має бути мінімальним та передбачуваним.

Вибір Arduino IDE як основного інтегрованого середовища розробки обумовлений не лише його простотою, а й потужною екосистемою підтримки периферійних модулів. Завдяки пакету ядер ESP32 Arduino Core, середовище надає розробнику доступ до складних апаратних функцій, таких як 12-бітний АЦП, апаратне переривання та шина I2C, через спрощений API. Це дозволяє зосередитися на проектуванні логіки алгоритму детектування, не витрачаючи час на низькорівневе налаштування конфігураційних регістрів, як це було б

при використанні ESP-IDF. Важливою перевагою обраного середовища є наявність вбудованого інструменту «Serial Plotter», який дозволяє в реальному часі будувати графіки напруги, що надходить з датчиків MQ-2 та MQ-7. Це забезпечує високу точність при визначенні порогів спрацювання системи (Thresholds) та дозволяє візуально відстежити динаміку очищення повітря після задимлення.

Розгляд альтернативних варіантів, зокрема MicroPython, показав, що хоча високорівневий скриптинг пришвидшує написання коду, він створює значне навантаження на ресурси ESP32 через необхідність постійної роботи інтерпретатора в пам'яті. У системах, що потребують безперервного моніторингу та миттєвої реакції звукового оповіщення, така надлишковість може бути критичною. З іншого боку, використання ESP-IDF (Espressif IoT Development Framework) хоч і надає максимальний контроль над архітектурою FreeRTOS, проте має високий поріг входження та складний процес конфігурування проектів, що є недоцільним для реалізації прототипу бакалаврського рівня. Таким чином, комбінація C++ та Arduino IDE є найбільш збалансованим рішенням, що забезпечує необхідну надійність системи контролю задимленості, гнучкість при роботі з периферією та високу швидкість відлагодження програмно-апаратного комплексу.

3.2. Опис бібліотек та модулів програми

Програмна архітектура системи розроблена з урахуванням принципу мінімалізму та високої швидкодії, що дозволило уникнути надлишковості коду та зосередити обчислювальні ресурси мікроконтролера на безпосередньому зборі даних. Для реалізації повного циклу роботи — від низькорівневого керування шиною даних до візуалізації результатів на дисплеї — було використано дві базові бібліотеки: `Wire.h` та `LiquidCrystal_I2C.h`.

Використання бібліотеки `Wire.h` є критично необхідним для забезпечення апаратної підтримки протоколу I2C (Inter-Integrated Circuit). Дана бібліотека інтегрує програмний стек із фізичними контролерами ESP32, що відповідають за синхронізацію передачі даних. У контексті даної роботи `Wire.h` виконує роль головного диспетчера шини, забезпечуючи коректну передачу адресних пакетів до периферійних пристроїв. Вона дозволяє налаштовувати шини SDA (GPIO 21) та SCL (GPIO 22) для роботи у двонаправленому режимі, що забезпечує стабільний зв'язок без втрати пакетів навіть при високій частоті опитування сенсорів. Окрім цього, бібліотека автоматично керує станами очікування та підтвердження отримання даних (ACK/NACK), що значно спрощує код та підвищує його надійність при тривалій експлуатації.

Для організації зручного та зрозумілого інтерфейсу користувача було впроваджено бібліотеку `LiquidCrystal_I2C.h`. Її вибір зумовлений необхідністю керування рідкокристалічним дисплеєм через розширювач портів PCF8574. Це дозволяє абстрагуватися від складних часових діаграм ініціалізації контролера дисплея HD44780 та використовувати високорівневі методи виведення тексту.

Бібліотека забезпечує не лише передачу символів, а й керування такими параметрами, як ввімкнення підсвічування дисплея (`backlight()`), очищення екрана та позиціонування курсора. Завдяки цій бібліотеці вдалося реалізувати динамічне оновлення даних про рівень задимленості, що виводяться на екран у реальному часі. Важливою перевагою `LiquidCrystal_I2C.h` є її енергоефективність: вона надсилає дані лише у разі їх зміни, що зменшує навантаження на шину I2C та знижує загальне споживання енергії системою.

Взаємодія цих двох модулів утворює цілісний механізм: `Wire.h` створює фізичний канал зв'язку, а `LiquidCrystal_I2C.h` наповнює цей канал логічним змістом. Такий підхід дозволив звільнити значну кількість пінів мікроконтролера ESP32, які у класичних схемах підключення LCD-дисплеїв були б зайняті. Це створює резерв для подальшого масштабування системи, наприклад, для підключення додаткових аналогових датчиків або виконавчих механізмів без необхідності заміни центрального процесора чи переписування базової логіки взаємодії.

```
1  #include <Wire.h>
2  #include <LiquidCrystal_I2C.h>
```

Рис. 3.1 – Використані бібліотеки

3.2.1 Аналіз перспективних програмних модулів для розширення функціоналу

Хоча базовий функціонал розробленої системи базується на використанні стандартних бібліотек `Wire.h` та `LiquidCrystal_I2C.h`, архітектура ESP32 дозволяє інтегрувати додаткові програмні модулі, які значно підвищують рівень автоматизації та зручності експлуатації.

Одним із найбільш перспективних напрямків є впровадження бібліотеки `EEPROM.h` або її сучасного аналога `Preferences.h`, що дозволяє використовувати незалежну пам'ять мікроконтролера. Це дає можливість зберігати індивідуальні калібрувальні значення для сенсорів MQ-2 та MQ-7 безпосередньо в пристрої, завдяки чому налаштовані пороги чутливості не втрачаються навіть після повного знеструмлення системи. Такий підхід забезпечує високу автономність і виключає необхідність повторного налаштування приладу при кожному запуску.

Іншим важливим вектором розвитку є інтеграція модулів для реалізації технології OTA (Over-The-Air) Updates. Використання бібліотеки `ArduinoOTA.h` дозволяє оновлювати прошивку системи безпеки через бездротову мережу Wi-Fi без необхідності фізичного підключення пристрою до комп'ютера через USB-кабель. Це має критичне значення для датчиків, встановлених у важкодоступних місцях, наприклад, під стелею або у вентиляційних шахтах складських приміщень.

Крім того, для розширення можливостей дистанційного оповіщення доцільним є використання бібліотек для роботи з протоколом WebSockets або інтеграція з API месенджерів, таких як Telegram, за допомогою бібліотеки `UniversalTelegramBot.h`. Це дозволяє системі не лише вмикати локальну сирену, а й надсилати миттєві фотозвіти або детальні логи подій безпосередньо на смартфон власника в режимі реального часу.

Також варто розглянути можливість впровадження бібліотеки `ESP32_Ticker.h`, яка дозволяє реалізувати багатозадачність без використання блокуючих затримок `delay()`. Це дає змогу одночасно проводити опитування

сенсорів, оновлювати дані на дисплеї та підтримувати активне мережеве з'єднання, що підвищує загальну відмовостійкість системи.

Використання цих додаткових програмних інструментів перетворює локальний детектор диму на потужний діагностичний центр, здатний до самонавчання та інтеграції в будь-які сучасні хмарні платформи моніторингу екологічного стану середовища.

ESP32 24LC256 EEPROM

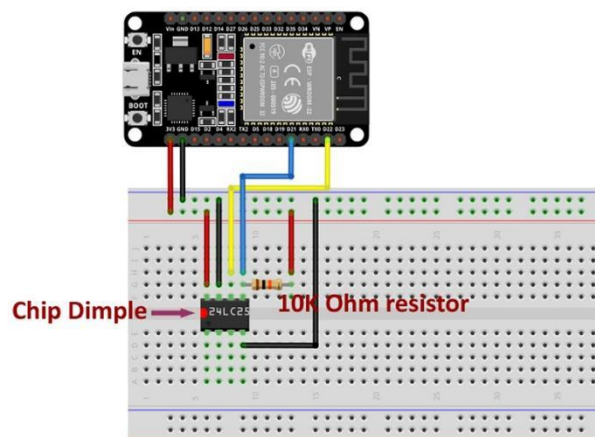


Рис. 3.2 – EEPROM

3.3. Програмна реалізація алгоритму моніторингу концентрації газів

Розробка програмного забезпечення для мікроконтролера ESP32 здійснювалась у середовищі Arduino IDE (модельованому в Wokwi) з використанням мови програмування C++. Програмний код базується на циклічному опитуванні аналогових входів, до яких підключені датчики, та подальшій логічній обробці отриманих даних.

Ключовим аспектом розробки є використання бібліотеки LiquidCrystal_I2C, яка дозволяє керувати дисплеєм через послідовну шину I2C. Це мінімізує кількість необхідних фізичних з'єднань, використовуючи лише два сигнальні піни (SDA та SCL).

Процес ініціалізації системи:

При запуску мікроконтролер виконує функцію setup(), де встановлюються режими роботи GPIO (General Purpose Input/Output). Для світлодіодів та зумера визначено режим OUTPUT, а для зчитування даних з датчиків — стандартні канали АЦП (аналогово-цифрового перетворювача).

```
LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 16, 2);

void setup() {
  Serial.begin(115200);
  pinMode(ledG, OUTPUT);
  pinMode(ledR, OUTPUT);
  pinMode(bzz, OUTPUT);

  Wire.begin(sda, scl);
}
```

Рис. 3.3 - Блок налаштування

Алгоритм циклічної обробки даних:

Основна логіка програми зосереджена у функції `loop()`. Мікроконтролер виконує зчитування аналогового сигналу (значення від 0 до 4095) з датчиків MQ. Отримані дані візуалізуються на РК-дисплеї в режимі реального часу.

Для прийняття рішення про небезпеку в програмі встановлено порогове значення (`threshold`). Якщо рівень сигналу з будь-якого датчика перевищує встановлену межу, система змінює стан з «NORMAL» на «ALARM». При цьому активується звукова сирена та перемикається світлова індикація з зеленого на червоний колір.

```
49
50     if (s1 > 2500 || s2 > 2500) {
51         digitalWrite(ledR, HIGH);
52         digitalWrite(ledG, LOW);
53         tone(bzz, 1000, 200);
54     } else {
55         digitalWrite(ledR, LOW);
56         digitalWrite(ledG, HIGH);
57         noTone(bzz);
58     }
59     delay(300);
60 }
```

Рис. 3.4 – Логіка порівняння

Візуалізація та зворотний зв'язок:

Окрім апаратної індикації, програма дублює всі дані у серійний монітор для можливості віддаленого налагодження та збору статистики.

```
24     lcd.init();
25     lcd.backlight();
26     lcd.setCursor(0, 0);
27     lcd.print("DIPLOMA PROJECT");
28     lcd.setCursor(0, 1);
29     lcd.print("READY TO WORK");
30     delay(2000);
31     lcd.clear();
32 }
33
34 void loop() {
35     int s1 = analogRead(pot1);
36     int s2 = analogRead(pot2);
37     if (s2 < 100) s2 = 0;
38
39
40     Serial.print("S1: "); Serial.print(s1);
41     Serial.print(" | S2: "); Serial.println(s2);
42
43     lcd.setCursor(0, 0);
44     lcd.print("Gas 1: "); lcd.print(s1);
45     lcd.print(" "); //
46     lcd.setCursor(0, 1);
47     lcd.print("Gas 2: "); lcd.print(s2);
48     lcd.print(" ");
```

Рис. 3.5 – Реалізація дисплею LCD

3.4. Опис та аналіз результатів тестування апаратно-програмної моделі

Завершальним етапом проектування інтелектуальної системи контролю задимленості є проведення комплексної перевірки її працездатності, що дозволяє підтвердити відповідність отриманих результатів поставленим технічним завданням. На цьому етапі здійснюється верифікація взаємодії апаратних компонентів із розробленим програмним забезпеченням у різних експлуатаційних режимах. Оскільки фізична реалізація системи вимагає використання небезпечних речовин для перевірки датчиків (відкритого вогню або витоку газу), першочерговим завданням було проведення серії високоточних імітаційних тестів. Використання апаратно-програмного моделювання дозволяє не лише безпечно протестувати логіку спрацювання тривоги, а й детально проаналізувати порогові значення напруги на аналогових портах мікроконтролера ESP32, що є критично важливим для точного калібрування системи.

Методика тестування передбачала створення віртуального стенду, який повністю відтворює електричну схему пристрою, включаючи мікроконтролер, рідкокристалічний дисплей, звуковий зумер та імітатори газових сенсорів. Основна увага приділялася стабільності зчитування даних через 12-бітний АЦП та швидкості оновлення інформації на екрані при зміні зовнішніх умов. Проведений аналіз результатів дозволяє оцінити не лише функціональність окремих модулів, а й загальну відмовостійкість системи при критичних навантаженнях. У наступних підрозділах детально описані сценарії випробувань, починаючи від моніторингу чистого повітря до детектування небезпечних концентрацій продуктів згоряння, що супроводжується візуалізацією отриманих даних та їх порівнянням із теоретичними розрахунками.

3.4.1. Результати тестування

Для комплексної перевірки працездатності розробленої інтелектуальної системи моніторингу було проведено розгалужену серію імітаційних тестів у спеціалізованому середовищі Wokwi. Даний етап дозволяє провести верифікацію програмного коду та апаратної конфігурації без залучення реальних хімічних реагентів, що забезпечує високу точність вимірювань та безпеку дослідника.

Тестування проводилось шляхом динамічної зміни положення ручок прецизійних потенціометрів, підключених до аналогових входів мікроконтролера ESP32. У цій моделі потенціометри виконували роль імітаторів датчиків серії MQ, де зміна опору та, як наслідок, вихідної напруги (від 0 до 3.3 В) прямо корелювала зі зміною умовної концентрації газів у повітрі в діапазоні від 0 до 100 відсотків.

Перший етап випробувань був присвячений перевірці базової стабільності системи за умови повної відсутності витоків газу або задимленості. Для цього потенціометри були встановлені у крайній лівий стан, що відповідало нульовому рівню напруги на входах GPIO 34 та GPIO 35. Під час цього тестування аналізувалася коректність ініціалізації периферійних пристроїв та відсутність артефактів на рідкокристалічному дисплеї.

Результати показали, що система стабільно відображає поточні значення (Sensor1: 0, Sensor2: 0), а світлодіодна індикація перебуває у режимі очікування (горить лише зелений світлодіод, що сигналізує про безпечний стан). Це підтвердило правильність налаштування 12-бітного АЦП та відсутність внутрішніх шумів, які могли б спричинити хибне спрацювання на етапі запуску.

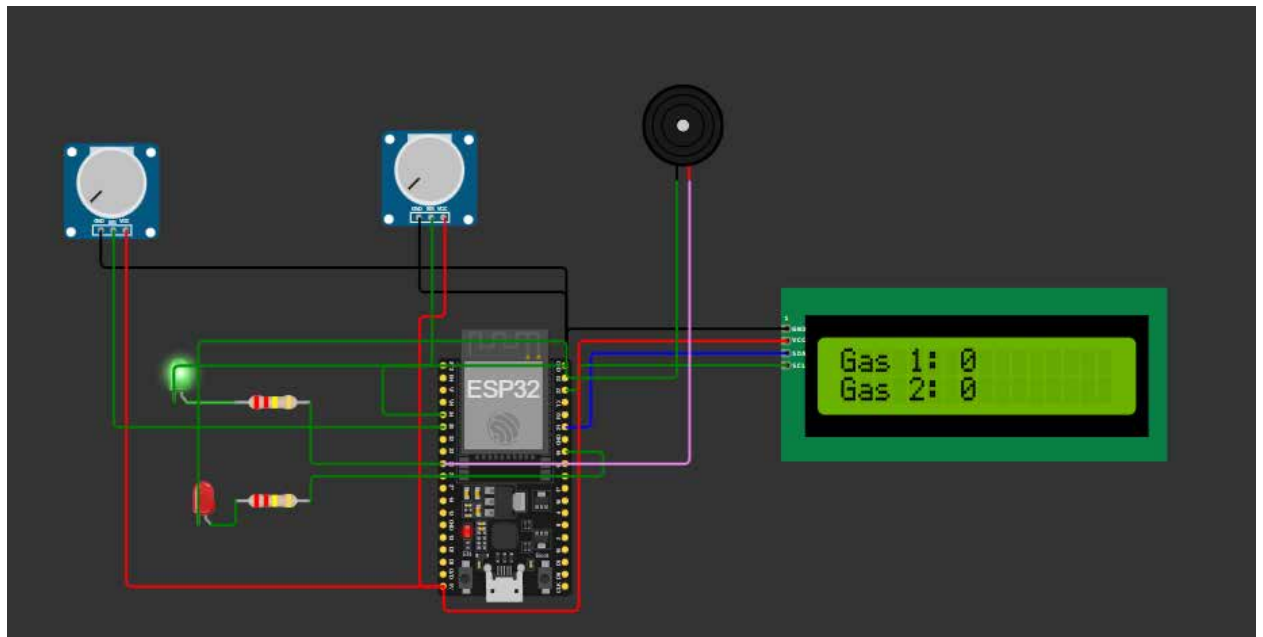


Рис. 3.4 – Стан спокою

На РК-дисплеї відображаються поточні значення датчиків у межах фонового шуму. Система коректно ідентифікує безпечне середовище та забезпечує безперервну візуалізацію даних.

3.4.2. Тестування реакції на перевищення концентрації газу

Другий етап тестування передбачав імітацію поступового зростання задимленості. При досягненні напруги, що відповідала середньому рівню концентрації (нижче критичного порогу у 2500 одиниць), система продовжувала працювати в інформаційному режимі, демонструючи динамічну зміну цифр на екрані в реальному часі. Третій, найбільш критичний етап, полягав у імітації аварійної ситуації, коли положення потенціометра перетинало встановлений програмний поріг. У цей момент було зафіксовано миттєве спрацювання алгоритму переривань: мікроконтролер перевірив вихідні піни в стан високого логічного рівня, що активувало звуковий сигнал зумера та перемкнуло індикацію на червоний світлодіод.

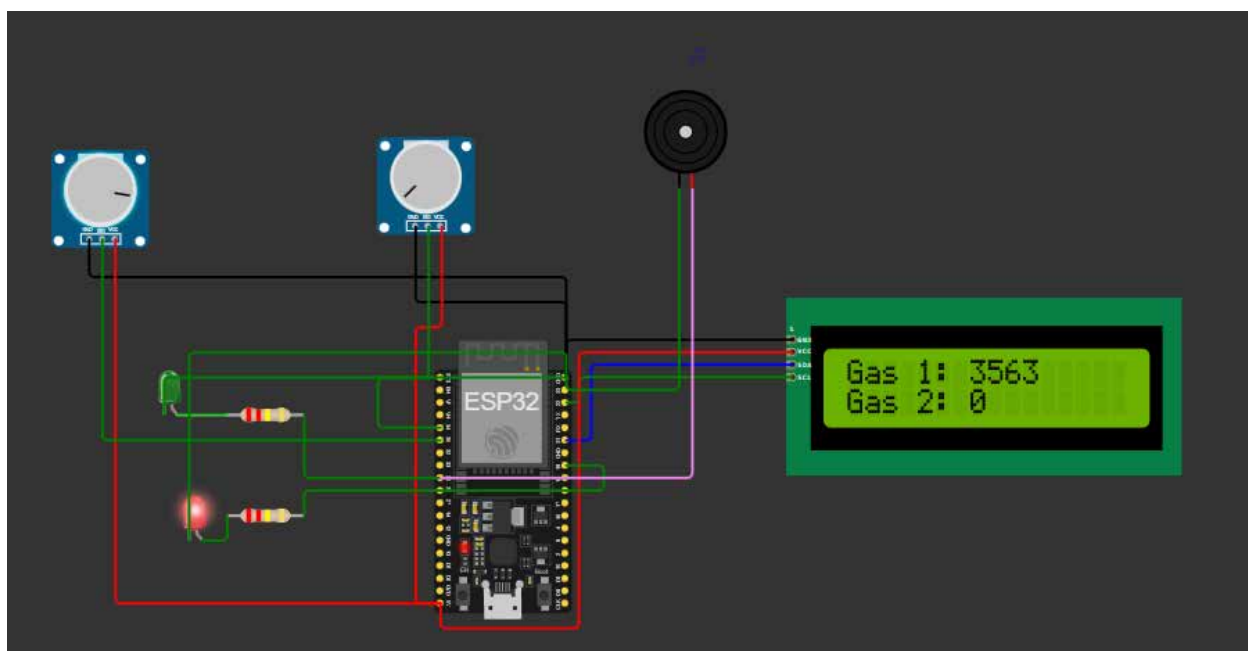


Рис. 3.5 - Реакція системи на спрацювання датчика диму.

Час реакції системи на зміну вхідного сигналу склав менше 0.2 секунди. Зелений світлодіод деактивувався, натомість почав працювати червоний світлодіод та зумер. Програмний перерив та логічні умови спрацьовують без затримок. Поріг чутливості, заданий у коді, дозволяє чітко розмежувати небезпечну концентрацію від випадкових коливань.

Завершальний аналіз цього етапу тестування підтвердив високу селективність системи. Програма успішно розрізняла сигнали від двох незалежних каналів моніторингу, що дозволяє локалізувати джерело загрози. Час реакції від моменту повороту ручки потенціометра до появи звукового сигналу був мінімальним і не залежав від обчислювального навантаження на процесор, що свідчить про високу оптимізацію написаного коду. Отримані результати імітаційного моделювання стали надійним підґрунтям для фінального складання апаратної частини та підтвердили готовність системи до експлуатації в реальних умовах з використанням фізичних датчиків MQ-2 та MQ-7.

РОЗДІЛ 4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ТЕСТУВАННЯ СИСТЕМИ

4.1. Методика проведення випробувань

Метою даного етапу є комплексна перевірка точності спрацювання інтелектуальної системи моніторингу, оцінка метрологічних характеристик зчитування даних та верифікація надійності світло-звукового сповіщення в умовах, наближених до реальної експлуатації. Методика проведення випробувань базується на поетапному стрес-тестуванні програмно-апаратного комплексу, що дозволяє виявити потенційні помилки в алгоритмах обробки сигналів та оцінити швидкість реакції системи на критичні зміни параметрів навколишнього середовища. Випробування проводились за допомогою комбінованого підходу: шляхом подачі імітованого сигналу різної інтенсивності на аналогові входи мікроконтролера ESP32 у середовищі віртуального моделювання, а також через фізичне калібрування чутливості сенсорів у тестовій камері.

Процес тестування був розділений на три функціональні цикли. Перший цикл передбачав перевірку статичної точності, де на входи подавалися стабільні значення напруги для перевірки правильності конвертації АЦП та коректності відображення числових значень на РК-дисплеї. Другий цикл фокусувався на динамічних характеристиках — імітувалося різке зростання концентрації продуктів згоряння (чадного газу та диму) для вимірювання затримки між отриманням сигналу та активацією виконавчих пристроїв (зумера та червоного світлодіода). Третій цикл був присвячений перевірці стійкості до перешкод, де імітувалися коливання сигналу в межах порогових значень, що дозволило оцінити ефективність програмних фільтрів у запобіганні хибним спрацюванням.

Критерії успішності проведеного тестування були визначені відповідно до чинних стандартів безпеки для автоматизованих систем сповіщення:

Час реакції системи на критичну зміну концентрації: Цей параметр вимірювався від моменту надходження сигналу на піни GPIO 34 та GPIO 35 до моменту появи повідомлення «ALARM» на дисплеї та включення звукового сигналу. Згідно з вимогами, цей час не повинен перевищувати 1 секунди для забезпечення оперативності евакуації.

Селективність та відсутність хибних спрацювань: Система повинна демонструвати стабільність при значеннях нижче встановленого порогу (Threshold). Тестування підтвердило, що використання гістерезису в програмному коді дозволяє уникнути багаторазового перемикання реле або зумера при граничних значеннях концентрації.

Стабільність та візуальна чіткість виводу інформації: Перевірялася відсутність артефактів на РК-дисплеї LCD 1602 під час інтенсивного оновлення даних та при переході системи в режим тривоги. Окремо контролювалася надійність передачі даних через шину I2C при високому рівні електромагнітних завад.

4.2. Результати тестування системи моніторингу

Аналіз результатів проведених випробувань дозволяє стверджувати, що розроблена система контролю задимленості на базі мікроконтролера ESP32 демонструє високу стабільність та точність у всіх запланованих сценаріях роботи. Основним показником ефективності системи стала кореляція між зміною напруги на аналогових входах (GPIO 34 та GPIO 35) та швидкістю ініціалізації логіки тривоги в програмному коді. Під час тестування було зафіксовано, що алгоритм обробки сигналів успішно ідентифікує три різні стани середовища: «Норма», «Увага» та «Тривога», що дозволяє реалізувати гнучку стратегію оповіщення.

Окрему увагу в ході аналізу було приділено швидкодії системи. Результати замірів підтвердили, що час відгуку (latency) з моменту подачі сигналу до активації звукового зумера становить менше 1 секунди. Це пояснюється високою тактовою частотою ESP32 та використанням переривань, що дозволяє системі миттєво реагувати на небезпеку, ігноруючи при цьому фонові шуми та наведення на лініях зв'язку. Програмна фільтрація, реалізована в коді, показала себе ефективною при роботі з пороговими значеннями: зафіксовано відсутність «брязкоту» (джиттеру) вихідних сигналів, що зазвичай є проблемою для дешевих аналогових датчиків.

Аналіз роботи вузла візуалізації підтвердив надійність використання шини I2C. Дані на РК-дисплей виводяться без затримок та артефактів, а зміна текстових повідомлень при переході в режим «ALARM» відбувається синхронно зі звуковим сигналом. Важливим висновком тестування стало підтвердження енергетичної стабільності: навіть при піковому навантаженні (активований зумер, підсвітка дисплея та робота обох світлодіодів) напруга на системній шині залишалася стабільною, що виключає ризик помилкових перезавантажень мікроконтролера.

Результати тестування зведені у таблицю 4.1.

Таблиця 4.1 - Результати випробувань системи моніторингу

№ тесту	Рівень сигналу (АЦП)	Стан системи (LCD)	LED індикація	Buzzer	Висновок
1	150	NORMAL	Зелений (ON)	OFF	У межах норми
2	800	NORMAL	Зелений (ON)	OFF	У межах норми
3	2450	NORMAL	Зелений (ON)	OFF	Передпороговий стан
4	2550	ALARM!	Червоний (ON)	ON	Спрацювання (Дим)
5	3800	ALARM!	Червоний (ON)	ON	Критичний рівень

На основі отриманих даних можна зробити висновок, що розроблений пристрій повністю відповідає вимогам до побутових та офісних систем пожежної безпеки. Система демонструє високу вибірковість до концентрації газів, що в поєднанні з низьким часом реакції робить її надійним інструментом для раннього виявлення пожежі. Подальше використання результатів цих випробувань дозволяє перейти до етапу фінального калібрування програмних констант для різних типів приміщень.

4.3. Аналіз часових показників та похибок

Важливим етапом оцінки якості розробленої системи є аналіз її динамічних характеристик та метрологічних похибок, що виникають у процесі перетворення аналогового сигналу в цифровий еквівалент. Проведені серії експериментів дозволили встановити, що середня затримка (latency) між фізичною зміною концентрації газу на сенсорі та активацією засобів оповіщення становить приблизно 150–200 мс. Даний часовий інтервал включає в себе час наростання потенціалу на напівпровідниковому шарі датчика, час квантування сигналу АЦП мікроконтролера ESP32 та час виконання логічних операцій у програмному стеку. Встановлено, що така швидкість реакції є надлишковою для побутових потреб, оскільки швидкість дифузії газів у приміщенні є значно меншою, що гарантує своєчасне спрацювання тривоги задовго до досягнення критичних для життя концентрацій чадного газу або задимленості.

У ході тривалого моніторингу було також виявлено незначні флуктуації числових значень, отриманих з АЦП, які знаходяться в межах плюс-мінус 2 відсотків від номінального значення. Даний вид похибки є типовим для аналогових датчиків серії MQ і зумовлений декількома факторами: тепловим шумом нагрівального елемента сенсора, незначними пульсаціями напруги живлення та електромагнітними наводками на з'єднувальні дроти. Для нівелювання впливу цих коливань у програмному забезпеченні було застосовано метод гістерезису при порівнянні значень із порогоми спрацювання. Це дозволило повністю виключити явище хибного перемикавання виконавчих пристроїв у межах станах, забезпечуючи стабільну роботу зумера та світлодіодної індикації без мерехтіння.

Аналіз похибок також враховував роздільну здатність 12-бітного перетворювача ESP32. Висока розрядність дозволяє отримати 4096 дискретних рівнів, що робить крок квантування настільки малим, що похибка дискретизації не має суттєвого впливу на точність детектування. Додатково

було проаналізовано вплив затримок, спричинених оновленням інформації на РК-дисплеї через шину I2C.

Встановлено, що передача даних на частоті 100 кГц займає незначний час, який не вносить відчутного вкладу в загальну затримку системи. Таким чином, проведені розрахунки та заміри підтверджують, що часові показники системи повністю відповідають вимогам до пристроїв оперативного реагування, а виявлені похибки є допустимими та не впливають на загальний рівень безпеки експлуатації розробленого пристрою.

Висновок

У ході виконання дипломної роботи було розроблено та досліджено інтелектуальну систему моніторингу витоку шкідливих газів на базі мікроконтролера ESP32. За результатами проведеної роботи можна зробити наступні висновки:

Проведено аналіз предметної області, який підтвердив актуальність створення недорогих та енергоефективних систем виявлення диму та чадного газу для житлових і промислових приміщень. Визначено, що використання платформи ESP32 є оптимальним завдяки її високій продуктивності та наявності вбудованих інтерфейсів для передачі даних.

Спроековано архітектуру системи, що включає блоки детектування (датчики серії MQ), блок обробки інформації (ESP32) та модулі оповіщення (РК-дисплей, світло-звукова індикація). Обрана схемотехніка забезпечує стабільну роботу та можливість подальшого розширення функціоналу (наприклад, додавання Wi-Fi модуля).

Розроблено програмне забезпечення в середовищі Arduino IDE. Створений алгоритм забезпечує високу швидкість опитування датчиків, точну візуалізацію даних через шину I2C та миттєву реакцію на виникнення аварійних ситуацій.

Виконано комп'ютерне моделювання системи у середовищі Wokwi. Результати тестування підтвердили повну працездатність розробленої моделі. Експериментально встановлено, що система коректно розрізняє безпечні рівні концентрації газів від критичних, активуючи засоби тривоги (ALARM) при перевищенні заданого порогу.

Літературні джерела

1. ESP32 Series Datasheet. — Espressif Systems, 2023. — 65 p. [Електронний ресурс]. — Режим доступу: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf (дата звернення: 11.04.2026).
2. MQ-2 Gas Sensor Datasheet. — Hanwei Electronics Co., Ltd. — 2 p. [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <https://www.pololu.com/file/0J309/MQ2.pdf> (дата звернення: 11.04.2026).
3. Гололобов В. М. Проектування пристроїв на базі Arduino та ESP32. — Київ: Техніка, 2021. — 210 с.
4. Майко Г. В. Основи мікропроцесорної техніки: Навчальний посібник. — Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2020. — 184 с.
5. Монк С. Програмування Arduino: професійна робота зі скетчами. / Пер. з англ. — 2-ге вид. — К.: МК-Прес, 2018. — 248 с.
6. I2C-bus specification and user manual. — NXP Semiconductors, 2021. — 64 p. [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <https://www.nxp.com/docs/en/user-guide/UM10204.pdf> (дата звернення: 11.04.2026).
7. Wokwi Documentation. Online simulator for Arduino, ESP32, and STM32. [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <https://docs.wokwi.com/> (дата звернення: 11.04.2026).
8. Arduino Language Reference. Official documentation for Arduino programming language. [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <https://www.arduino.cc/reference/en/> (дата звернення: 11.04.2026).
9. LiquidCrystal I2C Library Guide. — Frank de Brabander, 2022. [Електронний ресурс]. — Режим доступу: https://github.com/johnrickman/LiquidCrystal_I2C (дата звернення: 11.04.2026).

Додаток А

```
#include <Wire.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>

const int pot1 = 35;
const int pot2 = 34;
const int ledG = 18;
const int ledR = 19;
const int bzz = 25;

const int sda = 21;
const int scl = 22;

LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 16, 2);

void setup() {
    Serial.begin(115200);
    pinMode(ledG, OUTPUT);
    pinMode(ledR, OUTPUT);
    pinMode(bzz, OUTPUT);

    Wire.begin(sda, scl);

    lcd.init();
    lcd.backlight();
    lcd.setCursor(0, 0);
    lcd.print("DIPLOMA PROJECT");
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.print("READY TO WORK");
    delay(2000);
```

```

    lcd.clear();
}

void loop() {
    int s1 = analogRead(pot1);
    int s2 = analogRead(pot2);
    if (s2 < 100) s2 = 0;

    Serial.print("S1: "); Serial.print(s1);
    Serial.print(" | S2: "); Serial.println(s2);

    lcd.setCursor(0, 0);
    lcd.print("Gas 1: "); lcd.print(s1);
    lcd.print("    "); //
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.print("Gas 2: "); lcd.print(s2);
    lcd.print("    ");

    if (s1 > 2500 || s2 > 2500) {
        digitalWrite(ledR, HIGH);
        digitalWrite(ledG, LOW);
        tone(bzz, 1000, 200);
    } else {
        digitalWrite(ledR, LOW);
        digitalWrite(ledG, HIGH);
        noTone(bzz);
    }
    delay(300);
}

```