

DOI: 10.20535/1970.71(1).2026.361806

УДК 004.5:681.518

АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА РАНЬОГО ВИЯВЛЕННЯ ПОЖЕЖИ¹⁾Повишенко О. А., ²⁾Зайцев Є. О.¹⁾Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна

²⁾Інститут електродинаміки Національної академії наук України, Київ, УкраїнаE-mail: povshenko.oleksandr@edu.kpi.ua, zaitsev@i.ua

Розробка автоматизованих систем пожежної безпеки є надзвичайно важливою, адже своєчасне виявлення осередків загорянь рятує життя та зменшує збитки. У роботі розглянуто розробку автоматизованої системи раннього виявлення пожежі на базі платформи ESP32 з використанням технологій Інтернету речей. Запропоновано використання мультисенсорного підходу для компенсації похибок газового сенсору MQ-2. Актуальність дослідження зумовлена необхідністю підвищення ефективності систем пожежної безпеки в умовах обмежених ресурсів вбудованих пристроїв та високих вимог до точності і швидкодії. Запропонована система поєднує можливості моніторингу концентрації диму та газів, температури і вологості повітря, що дозволяє комплексно оцінювати стан середовища та виявляти ознаки займання на ранніх стадіях.

Запропоновано алгоритм обробки даних, що включає фільтрацію сигналів, температурно-вологісну компенсацію, формування адаптивного порогу на основі статистичних параметрів та аналізу динаміки змін сигналу. Особливістю запропонованого підходу є використання комбінованого алгоритму прийняття рішень, який враховує не лише абсолютні значення параметрів, але й швидкість їх зміни. Це дозволяє більш точно виявляти осередки загорянь на початковій стадії пожежі, коли концентрація продуктів горіння ще невисока, але спостерігається тенденція до її зростання. З метою підвищення надійності системи введено декілька рівнів небезпеки, кожен з яких відповідає певному діапазону значень контрольованих параметрів.

Архітектура системи базується на концепції розподілених IoT-рішень із інтеграцією периферійної обробки даних (edge computing), що забезпечує зниження затримок, підвищення швидкодії та автономності функціонування. Хмарний рівень (cloud computing) реалізує централізоване зберігання, обробку та візуалізацію даних у реальному часі, а також забезпечує віддалений доступ користувачів до системи. Розроблена система підвищує точність виявлення пожежі і зменшує хибні спрацювання, підтверджуючи ефективність мультисенсорного аналізу та адаптивних алгоритмів.

Ключові слова: сенсор, обробка сигналів; IoT; автоматизація; система; ESP32; edge computing; мультисенсорний аналіз.

Вступ. Постановка проблеми

Своєчасне виявлення пожежі є одним із ключових завдань сучасних систем безпеки, оскільки дозволяє мінімізувати людські жертви та матеріальні збитки. За даними міжнародних досліджень, значна частина пожежі розвивається поступово, і саме рання стадія є найбільш критичною для ефективного реагування [1]. Тому створення автоматизованих систем раннього виявлення пожежі є актуальним науково-технічним завданням.

У [2] представлено огляд прогресу в технологіях виявлення пожежі за останні два десятиліття. Ці технології включають використання нових датчиків (наприклад, систему комп'ютерного зору, розподілений волоконно-оптичний датчик температури та інтелектуальний множинний датчик (multisensor)), технології обробки сигналів і моніторингу, а також інтегровані системи виявлення пожежі.

Традиційні системи пожежної сигналізації базуються на використанні датчиків диму або темпе-

ратури з фіксованими пороговими значеннями. Однак такі підходи мають ряд суттєвих недоліків: вони чутливі до шумів, не враховують зміни умов навколишнього середовища та часто генерують хибні спрацювання [3]. Це знижує довіру до системи та може призвести до ігнорування реальних загроз.

У сучасних умовах активно розвивається концепція Інтернету речей (IoT), яка передбачає використання розподілених сенсорних вузлів для моніторингу параметрів середовища в реальному часі [4].

Одним із перспективних напрямів побудови систем раннього виявлення пожежі є використання вбудованих обчислювальних платформ із підтримкою бездротового зв'язку, які забезпечують достатню продуктивність за низького енергоспоживання [5 – 12]. Такі рішення дозволяють реалізувати розподілені системи моніторингу в рамках концепції IoT та виконати первинну обробку даних безпосередньо на периферійних вузлах.

Для фіксації ознак займання широко застосовуються різноманітні сенсори, що реагують на продукти горіння та зміни параметрів повітряного середовища [11]. Однак їх використання супроводжується низкою суттєвих обмежень, зокрема низькою селективністю, чутливістю до зовнішніх факторів та наявністю значних шумових складових у вимірюваних сигналах. У результаті це призводить до складності інтерпретації даних і зниження достовірності виявлення пожежі, особливо на ранніх стадіях розвитку процесу горіння.

Підвищення точності детекції можливе за рахунок використання комплексного підходу, що передбачає одночасний аналіз декількох параметрів навколишнього середовища. Поєднання різних сенсорних даних дозволяє враховувати вплив температурних та вологісних умов, а також здійснювати корекцію вимірювань, зменшуючи вплив зовнішніх збурень.

Таким чином, виникає проблема, що полягає у забезпеченні достовірного раннього виявлення пожежі за умов шумних, нестабільних і взаємозалежних сенсорних даних при обмежених ресурсах вбудованих систем. Особливу складність становить необхідність поєднання високої достовірності виявлення пожежі з низьким енергоспоживанням і обчислювальною ефективністю.

Для розв'язання цієї проблеми в роботі пропонується застосування підходу мультисенсорного аналізу (multi-sensor data fusion), який передбачає об'єднання даних від декількох сенсорів та використання адаптивних алгоритмів обробки отриманих даних. Запропонований метод включає фільтрацію сигналів, адаптивне порогове визначення, аналіз динаміки змін та компенсацію впливу температури й вологості. Це дозволить підвищити точність виявлення пожежі та зменшити кількість хибних спрацювань.

Аналіз раніше виконаних робіт

З огляду на різноманітні сфери застосування систем раннього виявлення пожеж та необхідність віддаленого моніторингу, зокрема в сільському господарстві, промисловості та інших галузях, існує значна кількість підходів до побудови IoT-орієнтованих архітектур, що базуються на використанні сенсорних мереж, хмарних сервісів і вбудованих обчислювальних платформ.

У роботі [5] запропоновано підхід, що базується на інтеграції сенсорів диму та полум'я, обчислювального вузла на базі Raspberry Pi та хмарної платформи ThingSpeak для збору, зберігання та аналізу даних у режимі реального часу. Незважаючи на ефективність запропонованої IoT-архітектури, її суттєвими недоліками є залежність від хмарної інфраструктури, відсутність локальної обробки даних та обмежена адаптивність алгоритмів прийняття рішень. Крім того, система не враховує вплив температури та вологості на показни-

ки сенсорів і не використовує мультисенсорний підхід до аналізу даних. Це знижує її надійність та обмежує застосування в умовах реального часу і ресурсно-обмежених середовищах.

У [6] розглядається побудова системи раннього виявлення пожежі на основі платформи Arduino із використанням датчиків диму та температури. Запропоноване рішення орієнтоване на просту реалізацію системи моніторингу з можливістю формування сигналу тривоги при перевищенні порогових значень. Показано, що використання сенсорних модулів у поєднанні з мікроконтролером дозволяє створити доступну систему пожежної сигналізації, однак її функціональність обмежується використанням фіксованих порогів і не враховує вплив зовнішніх факторів.

У роботі [7] розглядається IoT-орієнтована система виявлення пожеж на основі платформи NodeMCU (ESP8266), яка інтегрує датчики температури та диму для моніторингу стану навколишнього середовища. Система забезпечує автоматичне сповіщення користувача про виникнення пожежі через мережеві сервіси, а також відображення поточного стану на LCD-дисплеї. Показано, що використання бездротових технологій і віддаленого моніторингу підвищує оперативність реагування, однак система залишається чутливою до хибних спрацювань через відсутність адаптивної обробки даних.

Робота [8] зосереджена на дослідженні застосування концепції периферійної обробки (edge computing) у поєднанні з IoT та безпілотними літальними апаратами для раннього виявлення пожеж. Запропонована архітектура передбачає розподілену обробку даних між периферійними вузлами та хмарними сервісами, що дозволяє зменшити затримки та підвищити ефективність обробки інформації. Показано, що інтеграція edge-обчислень із сенсорними мережами значно покращує швидкість системи, однак потребує складних алгоритмів керування ресурсами та обчислювально більш потужної інфраструктури.

У [9] запропоновано IoT-систему для моніторингу стану середовища з функцією раннього попередження про пожежу. Основна увага приділяється передачі даних і організації мережевої взаємодії, тоді як алгоритми обробки залишаються спрощеними та базуються на порогових значеннях.

У [10] запропоновано систему виявлення пожеж із використанням технологій IoT та штучних нейронних мереж. Застосування нейромережевого підходу дозволяє враховувати нелінійні залежності між параметрами середовища та підвищити точність класифікації станів. Система здатна аналізувати багатовимірні дані та визначати ймовірність виникнення пожежі. Проте використання нейронних мереж потребує значних обчислювальних ресурсів і попереднього навчання, що ускладнює її

реалізацію на ресурсно-обмежених вбудованих платформах і обмежує застосування в режимі реального часу.

У роботі [11] представлено комплексну систему, що поєднує IoT та методи штучного інтелекту для аналізу даних і автоматичного сповіщення. Незважаючи на підвищену точність, система залежить від складної інфраструктури та хмарних обчислень, що може призводити до затримок і зниження автономності.

У [12] розглядається система раннього виявлення пожеж із застосуванням багатоповових перцептронів (MLP) та методу оцінювання якості класифікації на основі ROC-кривих. Запропонований підхід дозволяє досягти високої точності розпізнавання пожежонебезпечних ситуацій за рахунок використання машинного навчання. Разом із тим застосування таких методів вимагає значних обчислювальних ресурсів, а також наявності репрезентативних навчальних вибірок, що ускладнює їх використання в реальних умовах експлуатації, особливо в системах із обмеженими апаратними можливостями.

На основі проведеного аналізу можна виокремити такі проблемні аспекти:

- залежність багатьох систем від хмарної інфраструктури та відсутність автономної обробки даних;
- використання спрощених порогових алгоритмів, що призводить до хибних спрацювань;
- недостатній облік впливу зовнішніх факторів на результати вимірювань;
- відсутність ефективного мультисенсорного аналізу;
- висока обчислювальна складність методів машинного навчання;
- обмежена придатність існуючих рішень для ресурсно-обмежених вбудованих систем.

Проведений аналіз показує, що існуючі системи раннього виявлення пожежі широко використовують IoT-платформи, сенсорні мережі та методи віддаленого моніторингу. Однак більшість із них або використовують прості порогові алгоритми, що призводить до хибних спрацювань, або потребують значних обчислювальних ресурсів і складної інфраструктури. Це обумовлює необхідність розробки ефективних методів обробки сенсорних даних, адаптованих до ресурсно-обмежених вбудованих систем.

Однією з перспективних платформ для побудови систем раннього виявлення є мікроконтролер ESP32, який поєднує достатню обчислювальну потужність, енергоефективність та підтримку бездротових технологій зв'язку. У даній роботі пропонується реалізація автоматизованої системи моніторингу на базі ESP32 із використанням газового сенсора MQ-2 та технологій IoT. З метою підвищення достовірності та точності вимірювань доцільним є застосування додаткових сенсорів

параметрів навколишнього середовища, зокрема DHT22, що забезпечує вимірювання температури та відносної вологості повітря.

Особливості застосування газоаналізатору MQ-2 для побудови системи раннього виявлення пожежі

Датчик газу MQ-2 використовується в системах пожежної безпеки, системах моніторингу витоків газу, та розумних будинках [13]. Цей сенсор ідеально підходить для моніторингу якості повітря в кухнях, котельнях та інших приміщеннях, де важливим є своєчасне виявлення газу або диму [14, 15].

Газоаналізатор MQ-2 належить до напівпровідникових газових сенсорів, чутливих до диму та ряду горючих газів [16]. Чутливий елемент датчика складається з керамічної трубки з покриттям Al_2O_3 та нанесеного на неї чутливого шару діоксиду олова (SnO_2), опір якого змінюється під дією молекул газів у повітрі. Всередині трубки проходить нагрівальний елемент, який нагріває чутливий шар до температури, за якої він починає реагувати на газ, що визначається. Чутливість до різних газів досягається варіюванням складу домішок у чутливому шарі. У звичайних умовах опір високий, а при наявності газів чи диму він зменшується, що дозволяє виміряти концентрацію шкідливих домішок.

Сенсори серії MQ здатні виявляти дим, пропан, метан, водень, спирт та інші легкозаймисті гази в діапазоні 300–10 000 ppm (діапазон вимірювань: пропан (C_3H_8) – 200-5000 ppm, бутан (C_4H_{10}) – 300-5000 ppm, метан (CH_4) – 500-20000 ppm, водень (H_2) – 300-5000 ppm). Усі датчики мають однотипний інтерфейс який складається з аналогового (змінна напруга, що відповідає рівню концентрації газів) і цифрового виходів (через вбудований компаратор із регульованим порогом). Чутливість сенсора регулюється підлаштувальним резистором.

Калібрування датчика. Газоаналізатор MQ-2 не вимірює концентрацію газів безпосередньо у ppm (частин на мільйон), та видає аналоговий сигнал, пропорційний зміні опору чутливого елемента. Щоб перетворити цей сигнал у значення концентрації газу, необхідно провести калібрування.

Калібрування полягає у визначенні базового опору сенсора R_0 в контрольному середовищі (звичай — чисте повітря). Сенсор підключають до живлення і прогривають 24–48 годин (так званий burn-in період). Вимірюють напругу на виході сенсора в умовах чистого повітря і обчислюють R_0 за наступною формулою :

$$R_S = R_L \cdot \frac{V_C - V_{OUT}}{V_{OUT}}, \quad (1)$$

де R_S – поточний опір сенсора, R_L – навантажувальний резистор, V_C – напруга живлення, V_{OUT} –

виміряна вихідна напруга. Отримане R_0 використовується як еталон для подальших вимірювань.

Характеристика чутливості. MQ-2 має нелінійну (експоненціальну) залежність між відношенням R_S/R_0 та концентрацією газу (ppm) [17]. Ця характеристика визначається експериментально виробником і подається у вигляді логарифмічних графіків показаних на рис. 1 [13]. Різні гази (CO , CH_4 , LPG, H_2 , дим тощо) мають власні криві, відповідно і власні коефіцієнти для визначення. Величина R_S означає опір у цільовому газі з різною концентрацією, R_0 – опір датчика в чистому повітрі.

Для наближеного опису цієї залежності використовують експоненціальну регресію у вигляді наступного рівняння [13] (2):

$$\text{ppm} = a \cdot \left(\frac{R_S}{R_0} \right)^b, \quad (2)$$

де a і b – коефіцієнти апроксимації, визначені з графіків документації датчика [13].

Кожен тип газу має свої коефіцієнти a і b , тому для коректного вимірювання потрібно:

1. обрати цільовий газ (наприклад, CO або LPG);
2. зчитати значення R_S/R_0 ;
3. підставити до рівняння з відповідними коефіцієнтами.

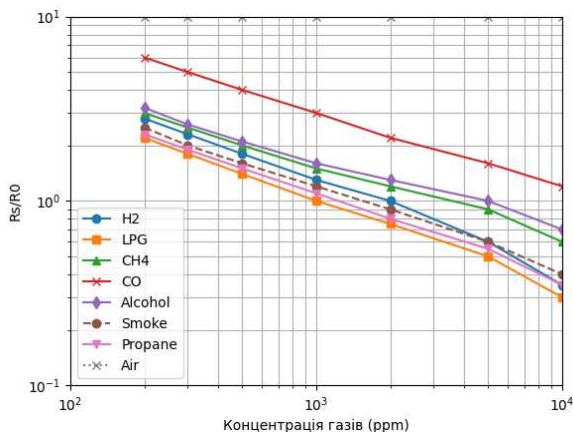


Рис. 1. Графік залежності концентрації речовини (ppm) від коефіцієнту опору датчика (R_S/R_0)

Таким чином, експоненціальна модель дозволяє перетворювати аналогові дані сенсора у числові значення концентрації, що є основою для аналізу загрози пожежі в системі ESP32.

Вплив вологості та температури на результати вимірювання. Газоаналізатор MQ-2, як і більшість напівпровідникових сенсорів, є чутливим не лише до концентрації газів, але й до параметрів навколишнього середовища – передусім до температури та вологості повітря. Це пояснюється тим, що основний чутливий елемент сенсора шар діоксиду олова (SnO_2) змінює свої електричні властивості залежно від температури навколишнього середовища, а водяна пара в повітрі впливає на

хімічні реакції, які відбуваються на його поверхні. На Рис. 2 показано типові характеристики температури та вологості [13]. По осі ординат наведено відношення опору сенсора (R_S/R_0), де R_S – опір сенсора в середовищі з концентрацією 1000 ppm бутану за різних значень температури та вологості, а R_0 – опір сенсора в середовищі з концентрацією 1000 ppm метану при 20 °C і відносній вологості 33%, 65 %, 85 %.

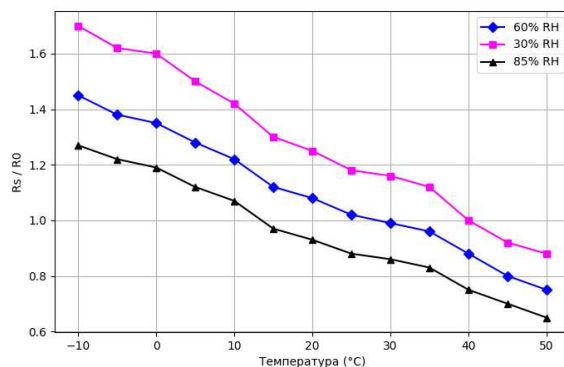


Рис. 2. Графік залежності коефіцієнту опору датчика (R_S/R_0) від температури та вологості [13]

Як видно з графіку, показаного на рис. 2, підвищення температури призводить до зменшення опору чутливого шару (тобто зниження R_S) навіть за незмінної концентрації газу. Це відбувається через зростання швидкості поверхневих реакцій та збільшення рухливості електронів. В результаті – сенсор показує вищу уявну концентрацію газу, ніж є насправді. А висока вологість, навпаки, може підвищити опір сенсора, оскільки молекули води блокують активні поверхневі ділянки, де відбувається взаємодія з газами. Це призводить до зниження чутливості, особливо при низьких температурах. За низької вологості ефект зменшується, і сенсор реагує швидше та точніше.

Для збереження характеристики датчика MQ-2 варто уникати впливу наступних чинників [17]:

- Впливу пари органічного кремнію. Чутливий матеріал втратить чутливість і ніколи не відновиться, якщо датчик поглине пару органічного кремнію. Слід запобігати контакту датчиків з кремнієвими зв'язками, кріпленнями, кремнієвим латексом, шпаклівкою або пластиком, що містить кремній;
- Високоагресивних газів. Якщо датчики піддаються впливу висококонцентрованого агресивного газу (такого як H_2S , SOX , Cl_2 , HCl тощо), це не тільки призведе до корозії структури датчиків, але й спричинить зниження чутливості;
- Забруднення лугами, солями лужних металів, галогенами. Продуктивність датчиків суттєво зміниться, якщо на них потраплять розбрикувані солі лужних металів, особливо розсол, або галогени, такі як фтор;
- Контакт з водою. Чутливість датчиків зни-

зяться при потраплянні бризок або зануренні у воду.

- Замерзання. Уникайте обмерзання поверхні датчика, інакше чутливий матеріал пошкодиться, і він втратить чутливість.
- Підвищеної напруги. Напруга, що подається на датчик, не повинна перевищувати зазначеного значення. Навіть за відсутності видимих механічних пошкоджень це може призвести до виходу з ладу лінії електропередачі або нагрівача, а також до суттєвої зміни характеристик чутливості датчика.

Сенсор температури й вологості DHT22

Цифровий сенсор DHT22, призначений для вимірювання температури та відносної вологості повітря [18]. Він складається з двох основних частин: емнісного датчика вологості та термістора, який змінює свій опір залежно від температури. Вбудований аналого-цифровий перетворювач (АЦП) обробляє сигнали з обох сенсорних елементів і формує готові цифрові дані. Застосування такого підходу забезпечує високу точність вимірювань і мінімізацію шумів під час їх передавання.

Діапазон вимірювання температури становить від $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+80\text{ }^{\circ}\text{C}$ з точністю близько $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$, а вологості – від 0 % до 100 % RH із похибкою не більше $\pm 2\text{--}5\text{ }%$. DHT22 характеризується стабільністю, низьким енергоспоживанням і можливістю передавання даних із частотою до одного разу на дві секунди.

Принцип зчитування даних із датчика DHT22 базується на використанні однопровідного (single-wire) цифрового інтерфейсу, через який передаються послідовні біти інформації про температуру та вологість. Обмін даними ініціюється мікроконтролером, який надсилає короткий імпульс запиту, після чого DHT22 формує відповідь у вигляді 40-бітного пакета – по 16 біт на показники вологості та температури, плюс 8 біт контрольної суми для перевірки цілісності даних. Завдяки цифровому формату передавання сенсор забезпечує високу завадостійкість і не потребує складного аналого-цифрового перетворення.

```
#define DHT_PIN 15
#define DHT_TYPE DHTesp::DHT22

MQUnifiedsensor MQ2(BOARD, MQ_VOLTAGE_REFERENCE, ADC_BIT_RESOLUTION, MQ_A_PIN, MQ_TYPE);
DHTesp dhtSensor;
```

Рис. 4. Приклад програмного коду для підключення датчика DHT22

Для корекції результатів вимірювання концентрації газу та диму у повітрі, в коді (рис. 4) було реалізовано функцію *MQ_correction*, яка враховує значення температури та вологості навколишнього середовища. Особливістю запропонованого підходу є використання комбінованого алгоритму прийняття рішень, який враховує не лише абсолютні значення параметрів, але й швидкість їх зміни. Це

Схему підключення датчиків MQ-2, DHT22 та зумера до плати ESP32S3 показано на рис. 3.

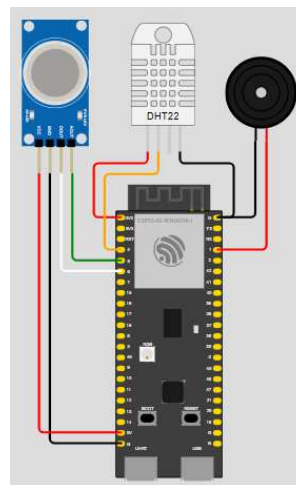


Рис. 3. Схема підключення датчиків

У системі раннього виявлення пожежі дані з DHT22 використовуються для корегування показників газоаналізатора MQ-2, оскільки чутливість останнього істотно залежить від температури та вологості навколишнього середовища. Наприклад, при підвищеній вологості або низькій температурі опір сенсора MQ-2 змінюється, що може призвести до хибного визначення концентрації диму чи газу. Тому комбінація MQ-2 і DHT22 дозволяє виконувати температурно-вологісну компенсацію, тобто скоригувати отримані значення газової концентрації за допомогою коефіцієнтів поправки, забезпечуючи стабільність і достовірність вимірювань навіть у змінних кліматичних умовах.

Для роботи з датчиками температури та вологості DHT11, DHT22 (AM2302) та подібними на платформах ESP8266 та ESP32 було адаптовано та оптимізовано бібліотеку DHTesp.h. Вона забезпечує просте зчитування даних через однопровідний інтерфейс (one-wire). На рис. 4 показано приклад коду для налаштування DHT22 (цифровий контакт для one-wire інтерфейсу).

дозволяє більш точно виявляти початкові стадії пожежі, коли концентрація продуктів горіння ще невисока, але спостерігається тенденція до її зростання.

Алгоритм роботи системи

На першому етапі здійснюється ініціалізація пінів мікроконтролера, калібрування сенсорів та

зчитування "сирих" даних із сенсорів. Далі виконується попередня обробка, яка включає усереднення значень, фільтрацію шумів та нормалізацію відносно базових параметрів. На наступному етапі проводиться оцінка стану середовища шляхом аналізу отриманих параметрів та їх динаміки. Блок-схема алгоритму показана на рис. 5.

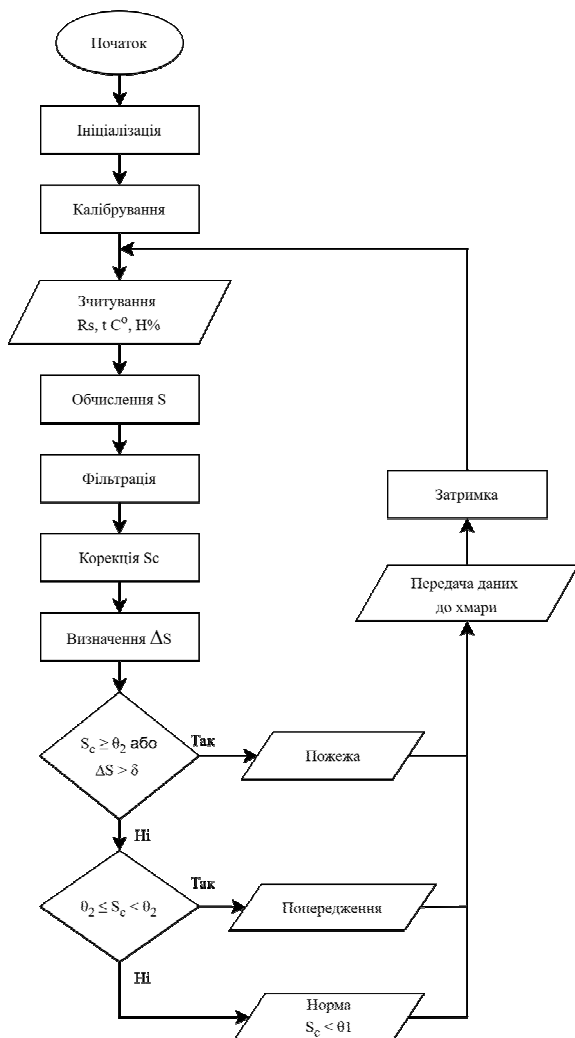


Рис. 5. Алгоритм роботи системи

Реалізація алгоритму на вбудованій платформі потребує оптимізації обчислювальних процесів, оскільки ресурси мікроконтролера є обмеженими. Тому у роботі використовуються спрощені математичні моделі та ефективні алгоритми обробки, що забезпечують баланс між точністю та швидкістю.

Вхідний сигнал сенсора MQ-2 описується як сума корисної складової $C(t)$ та шуму $n(t)$:

$$S(t) = C(t) + n(t). \quad (3)$$

Найважливішою складовою $n(t)$ в (3) призводить до похибки вимірювання. Ефективним засобом її зменшення є застосування попередньої обробки даних. Для цього на першому етапі здійснюється згладжування отриманого сигналу, за допомогою

ковзного середнього:

$$\tilde{S}(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} S(t-i), \quad (4)$$

де N – розмір вікна згладжування. Такий підхід дозволяє зменшити вплив випадкових шумів і підвищити якість сигналу.

На наступному етапі обробки виконується температурно-вологісна компенсація:

$$S_c(t) = \tilde{S}(t) \cdot (1 + \alpha(T - T_0) + \beta(H - H_0)), \quad (4)$$

де T, H – поточні значення температури та вологості відповідно; T_0, H_0 – еталонні значення, α, β – коефіцієнти чутливості. Це дозволяє врахувати вплив зовнішніх умов на характеристики сенсора.

Наступним кроком є формування адаптивного порогу, що обчислюється на основі статистичних параметрів сигналу:

$$\mu = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N S_c(i), \quad \sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (S_c(i) - \mu)^2}, \quad \theta = \mu + k \cdot \sigma, \quad (5)$$

де μ – математичне сподівання, σ – стандартне відхилення, k – коефіцієнт чутливості. Параметр θ – це адаптивний поріг прийняття рішення. Такий підхід дозволяє адаптувати поріг до поточних умов середовища.

Для виявлення швидких зростань концентрації газу навіть при відносно невеликих абсолютних значеннях запропоновано в алгоритмі (рис. 5) здійснювати аналіз динаміки зміни сигналу за наступною формулою:

$$\Delta S = S_c(t) - S_c(t-1). \quad (6)$$

На основі отриманих параметрів реалізується наступна логіка прийняття рішень:

$$State = \begin{cases} \text{Норма}, & S_c < \theta_1, \\ \text{Попередження}, & \theta_1 \leq S_c < \theta_2, \\ \text{Тривога}, & S_c \geq \theta_2, \text{ або } S > \delta \end{cases}$$

При досягненні порогових значень активується відповідний режим реагування: від попереджувального сигналу до повноцінної тривоги або активації додаткових виконавчих пристроїв (активація сигналізації та вентиляційних механізмів).

З метою зменшення кількості хибних спрацювань у системі реалізовано механізм підтвердження подій, який базується на повторному аналізі даних протягом заданого інтервалу часу. Це дозволяє відфільтрувати випадкові коливання сигналів і підвищити достовірність прийнятих рішень.

Запропонований алгоритм роботи системи дозволяє поєднати переваги мультисенсорного підходу та локальної обробки даних, забезпечуючи ефективно та своєчасне виявлення пожежі в умовах обмежених ресурсів.

Архітектура автоматизованої системи раннього виявлення пожежі

Архітектура запропонованої системи раннього виявлення пожежі з використанням технологій

IoT побудована за дворівневим принципом і включає рівень периферійної обробки (edge computing [19, 20]) та рівень хмарної обробки (cloud computing). Такий підхід дозволяє поєднати переваги локального аналізу даних у реальному часі з можливостями віддаленого моніторингу та зберігання інформації. Загальна концепція показана на рис. 6.

На периферійному рівні здійснюється безпосередній збір і первинна обробка даних із сенсорів, формується локальне прийняття рішення щодо наявності ознак пожежі. До складу цього рівня входять:

- газовий сенсор MQ-2, що забезпечує виявлення диму та горючих газів;
- датчик температури та вологості DHT22, який використовується для контролю параметрів середовища;
- мікроконтролер ESP32-S3, що виконує обробку даних.

Використання edge-обробки дозволяє суттєво зменшити затримки при виявленні небезпечних ситуацій та забезпечити автономність роботи сис-

теми навіть за відсутності підключення до мережі. Хмарний рівень призначений для централізованого збору, зберігання та аналізу даних, отриманих із периферійних вузлів.

Передача інформації здійснюється за допомогою бездротового зв'язку за стандартом 802.11 (Wi-Fi). Основними функціями хмарного рівня є: довготривале зберігання даних; візуалізація параметрів у реальному часі; віддалений доступ користувача до системи; формування повідомлень про стан системи; надсилання сповіщень про потенційну пожежу.

Користувацький інтерфейс реалізується у вигляді вебдодатку або мобільного застосунку, що забезпечує моніторинг параметрів у режимі реального часу. Інтерфейс надає можливість візуалізації даних у вигляді графіків і таблиць, перегляду історії вимірювань, а також налаштування параметрів системи. Додатково передбачено функції сповіщення про вихід показників за допустимі межі та віддаленого доступу до системи.

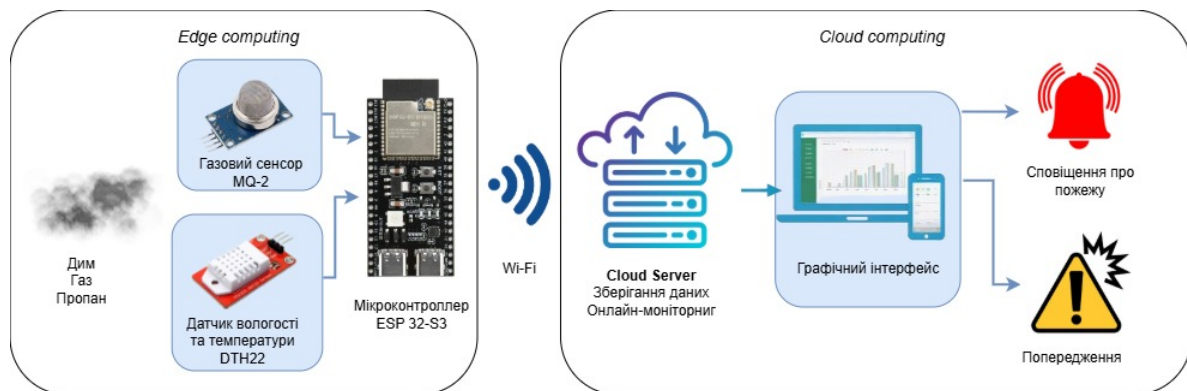


Рис. 6. Концепція архітектури автоматизованої IoT-системи раннього сповіщення про пожежу

Взаємодія між периферійним та хмарним рівнями здійснюється через мережевий канал зв'язку. На хмарний сервер передаються вже оброблені або частково оброблені дані, що зменшує навантаження на мережу та підвищує ефективність системи.

Важливою особливістю архітектури є розподіл функцій: критично важливі обчислення (виявлення пожежі) виконуються локально, а допоміжні функції (зберігання, аналітика, візуалізація) реалізуються в хмарі.

На основі результатів аналізу система генерує повідомлення користувачу попередження чи сигнал про пожежу. Запропонована архітектура дозволяє зручно проводити віддалений моніторинг та виявляти ознаки пожежі на ранньому етапі.

Висновки

У результаті проведеного дослідження розроблено автоматизовану систему раннього виявлення пожежі з використанням технологій IoT, яка реалі-

зує мультисенсорний підхід до аналізу параметрів навколишнього середовища. Запропонована архітектура системи поєднує локальну обробку даних із можливістю віддаленого моніторингу, що забезпечує оперативність реагування та підвищує автономність функціонування. Використання математичної моделі сенсора та алгоритмів компенсації впливу температури і вологості дозволило підвищити достовірність отриманих даних.

Розроблений алгоритм прийняття рішень, який базується на поєднанні адаптивного порогового методу та аналізу динаміки змін сигналу, продемонстрував високу ефективність у виявленні різних сценаріїв пожежонебезпечних ситуацій. Зокрема, вдалося зменшити кількість хибних спрацювань та забезпечити своєчасне реагування на початковій стадії займання. Це підтверджує доцільність використання адаптивних алгоритмів обробки даних у системах із обмеженими обчислювальними ресурсами.

Отримані результати відкривають перспективи подальших досліджень, спрямованих на вдосконалення алгоритмів обробки даних, зокрема із застосуванням методів машинного навчання, а також на розширення функціональних можливостей системи за рахунок інтеграції додаткових сенсорів і підвищення її масштабованості в рамках IoT-інфраструктур.

Література

- [1] D. Drysdale, *An Introduction to Fire Dynamics*. Wiley, 2011.
- [2] Z. Liu, “Review of Recent Developments in Fire Detection Technologies”, *J. Fire Protection Eng.*, т. 13, № 2, с. 129–151, трав. 2003. DOI:10.1177/1042391503013002003
- [3] B. Pospelov, E. Rybka, Y. Mykhailovska, Y. Bezuhla та A. Melnychenko, “Method for Detecting Fire Indoors Based on Differences in Sample Averages of an Arbitrary Gas Environment Dangerous Parameter at Adjacent Observation Intervals”, *Defect Diffus. Forum*, т. 437, с. 91–102, жовт. 2024. DOI: 10.4028/p-qlz4ob
- [4] J. Gubbi, R. Buyya, S. Marusic та M. Palaniswami, “Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions”, *Future Gener. Comput. Syst.*, т. 29, № 7, с. 1645–1660, верес. 2013. DOI: 10.1016/j.future.2013.01.010
- [5] A. Morchid, Z. Oughannou, R. E. Alami, H. Qjidaa, M. O. Jamil та H. M. Khalid, “Integrated internet of things (IoT) solutions for early fire detection in smart agriculture”, *Results Eng.*, т. 24, с. 103392, груд. 2024. DOI: 10.1016/j.rineng.2024.103392
- [6] O. I. Khalaf, G. M. Abdulsahib, and N. A. K. Zghair, “IoT fire detection system using sensor with Arduino”, *Aus*, no. 26, pp. 74–78, 2019. DOI:10.4206/aus.2019.n26-7
- [7] U. J. Wesly, R. V. S. Chaitanya, P. L. Kumar, N. S. Kumar, and B. S. K. Devi, “A detailed investigation on forest monitoring system for wildfire using IoT”, in *Proc. Int. Conf. Recent Developments in Electronics and Communication Systems (RDECS-2022)*, London, U.K.: SAGE Publications, 2023, pp. 315–320. DOI: 10.3233/ATDE221275 .
- [8] N. Kalatzis, M. Avgeris, D. Dechouniotis, K. Papadakis-Vlachopapadopoulos, I. Roussaki та S. Papavassiliou, “Edge Computing in IoT Ecosystems for UAV-Enabled Early Fire Detection”, in *2018 IEEE Int. Conf. Smart Comput. (SMARTCOMP)*, Taormina, 18–20 черв. 2018. IEEE, 2018. DOI: 10.1109/smartcomp.2018.00080
- [9] A. Divya, T. Kavithanjali та P. Dharshini, “IoT Enabled Forest Fire Detection and Early Warning System”, у *2019 IEEE Int. Conf. System, Computation, Automat. Netw. (ICSCAN)*, Pondicherry, India, 29–30 берез. 2019. IEEE, 2019. DOI: 10.1109/ICSCAN.2019.8878808
- [10] V. Dubey, P. Kumar, and N. Chauhan, “Forest Fire Detection System Using IoT and Artificial Neural Network”, in *Proc. Int. Conf. Innovative Computing and Communications*, Singapore: Springer, 2019. DOI: 10.1007/978-981-13-2324-9_33
- [11] K. Avazov *et al.*, “Forest fire detection and notification method based on AI and IoT approaches”, *Future Internet*, vol. 15, no. 2, p. 61, 2023. DOI: 10.3390/fi15020061
- [12] V. Vinodhini, M. R. S. Kumar, S. Sankar, D. Pandey, B. K. Pandey та V. K. Nassa, “IoT-based early forest fire detection using MLP and AROC method”, *Int. J. Global Warming*, т. 27, № 1, с. 55, 2022. DOI: 10.1504/ijgw.2022.122794
- [13] MQ-2 Gas Sensor Datasheet. [Online]. Available: <https://share.google/O4jxKzrgQDgcTM2SN>
- [13] L. M. Easterline, A. A.-Z. R. Putri, P. S. Atmaja, A. L. Dewi та A. Prasetyo, “Smart Air Monitoring with IoT-based MQ-2, MQ-7, MQ-8, and MQ-135 Sensors using NodeMCU ESP32”, *Procedia Comput. Sci.*, т. 245, с. 815–824, 2024. DOI: 10.1016/j.procs.2024.10.308
- [14] R. C. Pandey, M. Verma, and L. K. Sahu, “Internet of Things (IoT) based gas leakage monitoring and alerting system with MQ-2 sensor”, *Int. J. Engineering Development and Research*, vol. 5, no. 2, pp. 2135–2137, 2017. [Online]. Available: <https://rjwave.org/IJEDR/papers/IJEDR1702333.pdf>
- [15] “MQ-2 Semiconductor Sensor for Smoke & Flammable Gas”. Winsen Gas Sensor_CO2 Sensor_Air Quality Sensor_Dust Sensor_CO Sensor-Winsen Electronics. Дата звернення: 28 берез. 2026. [Online]. Available: <https://lnk.ua/uBXuStJYf>
- [16] D. A. Martillano, J. N. Corpuz, J. M. Disonglo та J. B. France, “Borehole and Near-Surface Greenhouse Gas Emission Monitoring System with Self-calibrating Algorithm and Zone-Based Data Analysis via Clustering Technique”, *Int. J. Environmental Sci. Develop.*, т. 11, № 4, с. 186–193, 2020. DOI: 10.18178/ijesd.2020.11.4.1249
- [17] DHT22 Temperature and Humidity Sensor Datasheet. [Online]. Available: <https://share.google/jjgGLyBxBW20nPqru>
- [18] B. Varghese, N. Wang, S. Barbhuiya, P. Kilpatrick та D. S. Nikolopoulos, “Challenges and Opportunities in Edge Computing”, у *2016 IEEE Int. Conf. Smart Cloud (SmartCloud)*, New York, NY, USA, 18–20 листоп. 2016. IEEE, 2016. DOI: 10.1109/smartcloud.2016.18
- [19] K. Cao, Y. Liu, G. Meng та Q. Sun, “An Overview on Edge Computing Research”, *IEEE Access*, т. 8, с. 85714–85728, 2020. DOI: 10.1109/access.2020.2991734

UDC 004.5:681.518

O. A. Povshenko, Ie. O. Zaitsev*National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine
Institute of Electrodynamics National Academy of Science of Ukraine, Kyiv, Ukraine***AUTOMATED EARLY FIRE DETECTION SYSTEM**

The development of automated fire safety systems is of critical importance, as timely detection of ignition sources saves lives and reduces damage. This paper considers the development of an automated early fire detection system based on the ESP32 platform using Internet of Things (IoT) technologies. A multisensor approach is proposed to compensate for the inaccuracies of the MQ-2 gas sensor. The relevance of the study is driven by the need to improve the efficiency of fire safety systems under the constraints of limited resources of embedded devices and high requirements for accuracy and response speed.

The proposed system integrates monitoring of smoke and gas concentrations, as well as air temperature and humidity, enabling a comprehensive assessment of environmental conditions and early detection of fire indicators.

A data processing algorithm is proposed, including signal filtering, temperature and humidity compensation, adaptive threshold formation based on statistical parameters, and analysis of signal dynamics. A key feature of the proposed approach is the use of a combined decision-making algorithm that considers not only absolute parameter values but also their rate of change. This allows more accurate detection of ignition sources at the early stages of fire development, when combustion product concentrations are still low but show a rising trend. To enhance system reliability, multiple hazard levels are introduced, each corresponding to specific ranges of monitored parameters.

The system architecture is based on distributed IoT solutions with integrated edge computing, which reduces latency, improves performance, and increases system autonomy. The cloud layer provides centralized data storage, processing, and real-time visualization, as well as remote user access. The developed system demonstrates stable real-time operation, reduces the number of false alarms, and improves fire detection accuracy compared to classical threshold-based methods. The obtained results confirm the effectiveness of using multisensor analysis and adaptive algorithms in fire safety systems.

Keywords: sensor; signal processing; IoT; automation; system; ESP32; edge computing; multisensor analysis.

*Надійшла до редакції
30 березня 2026 року*

*Рецензовано
17 квітня 2026 року*



© 2026 Copyright for this paper by its authors.
Use permitted under Creative Commons License Attribution 4.0 International (CC BY 4.0).