

ВОЙЧУР Юрій

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0003-3085-7315>

e-mail: voichury@khmnhu.edu.ua

МЕДЗАТИЙ Дмитро

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0009-0004-3247-6406>

e-mail: medza@ukr.net

ЖАНДРА Андрій

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0009-0006-6925-1950>

a.zhandra@gmail.com

ПІДСИСТЕМА ВИЯВЛЕННЯ ТА ЗАПОБІГАННЯ АВАРІЙНИМ СИТУАЦІЯМ В КІБЕРФІЗИЧНІЙ СИСТЕМІ «РОЗУМНИЙ БУДИНОК»

У представленій статті обґрунтовано концепцію та технічну реалізацію підсистеми виявлення та запобігання аварійним ситуаціям кіберфізичної системи «Розумний будинок». Актуальність дослідження зумовлена стрімкою цифровізацією побуту та ускладненням інженерних мереж. Кіберфізична система розглядається не просто як набір гаджетів, а як складний інтегрований простір, де цифрові сервіси та фізичні пристрої взаємодіють у безперервному циклі для забезпечення безпеки життєдіяльності. У роботі проведено детальний огляд існуючих рішень, що дозволило виявити їхні ключові недоліки – високу вартість та вузьку спеціалізацію на окремих загрозах. Для подолання цих бар'єрів запропоновано універсальну комплексну підсистему, яка базується на доступному та потужному контролері ESP32, що забезпечує високу швидкість обробки даних завдяки двоядерному процесору та вбудованим АЦП. Апаратний стек підсистеми включає лінійку напівпровідникових датчиків MQ-7, MQ-4 та MQ-2 для детектування чадного газу, метану й диму, а також цифровий термометр DS18B20 та зондовий датчик витоку води YI-S. Особливу увагу приділено архітектурі системи, яка побудована на трирівневій структурі – локальному рівні збору первинної інформації, середньому рівні первинної обробки на базі ESP32 та верхньому аналітичному рівні, де реалізовано модулі ситуаційного аналізу та прийняття рішень. Комунікація між рівнями здійснюється через протокол MQTT поверх Wi-Fi, що гарантує мінімальні затримки передачі даних та надійність доставки критичних повідомлень завдяки використанню рівня якості обслуговування QoS 1. Наукова новизна підходу полягає у використанні принципу ситуаційної інтелектуалізації, де система сприймає дані як цілісні сценарії, що дозволяє виконувати перехресну верифікацію подій, наприклад, підтверджувати факт пожежі одночасним зростанням температури та рівня задимлення, суттєво знижуючи ймовірність хибних тривог. Запропоноване рішення демонструє оптимальний баланс між вартістю компонентів та технічною складністю, трансформуючи житловий простір у саморефлексивне безпечне середовище.

Ключові слова: кіберфізична система «Розумний будинок», Інтернет речей (IoT), контролер ESP32, датчик MQ-7, датчик MQ-4, датчик MQ-2, датчик DS18B20, датчик YI-S, протокол MQTT, ситуаційний аналіз, автоматичне реагування.

VOICHUR Yuri, MEDZATYI Dmytro, ZHANDRA Andrii

Khmelnytskyi National University

SUBSYSTEM FOR DETECTING AND PREVENTING EMERGENCY SITUATIONS IN THE CYBER-PHYSICAL SYSTEM "SMART HOME"

This article substantiates the concept and technical implementation of a subsystem for detecting and preventing emergency situations in the cyber-physical system "Smart Home." The relevance of the study is due to the rapid digitalization of everyday life and the increasing complexity of engineering networks. The cyber-physical system is considered not just as a set of gadgets, but as a complex integrated space where digital services and physical devices interact in a continuous cycle to ensure safety. The paper provides a detailed review of existing solutions, revealing their key shortcomings: high cost and narrow specialization in specific threats. To overcome these barriers, a universal integrated subsystem is proposed, based on the affordable and powerful ESP32 controller, which provides high data processing speed thanks to a dual-core processor and built-in ADCs. The subsystem's hardware stack includes a line of MQ-7, MQ-4, and MQ-2 semiconductor sensors for detecting carbon monoxide, methane, and smoke, as well as a DS18B20 digital thermometer and a YI-S water leak probe sensor. Particular attention has been paid to the system architecture, which is based on a three-level structure: the local level for collecting primary information, the middle level for primary processing based on ESP32, and the upper analytical level, where situational analysis and decision-making modules are implemented. Communication between levels is carried out via the MQTT protocol over Wi-Fi, which guarantees minimal data transmission delays and reliable delivery of critical messages thanks to the use of QoS 1 quality of service level. The scientific novelty of the approach lies in the use of the principle of situational intellectualization, where the system perceives data as holistic scenarios, allowing for cross-verification of events, for example, confirming the fact of a fire by a simultaneous increase in temperature and smoke level, significantly reducing the likelihood of false alarms. The proposed solution demonstrates an optimal balance between component cost and technical complexity, transforming the living space into a self-reflective safe environment.

Keywords: cyber-physical system "Smart Home", Internet of Things (IoT), ESP32 controller, MQ-7 sensor, MQ-4 sensor, MQ-2 sensor, DS18B20 sensor, YI-S sensor, MQTT protocol, situational analysis, automatic response.

Стаття надійшла до редакції / Received 24.07.2025

Прийнята до друку / Accepted 24.08.2025

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ У ЗАГАЛЬНОМУ ВИГЛЯДІ ТА ЇЇ ЗВ'ЯЗОК ІЗ ВАЖЛИВИМИ НАУКОВИМИ ЧИ ПРАКТИЧНИМИ ЗАВДАННЯМИ

Сучасне розуміння кіберфізичних систем (КФС) значно еволюціонувало, перетворившись із вузькотехнічного терміна на фундаментальну міждисциплінарну категорію [1, 2]. Сьогодні така система розглядається як складний інтегрований простір, де обчислювальні алгоритми, цифрові сервіси та фізичні пристрої взаємодіють у безперервному циклі. КФС фактично стирає межу між віртуальним та матеріальним світами, об'єднуючи датчики, мікроконтролери та хмарні технології в єдину функціональну мережу [3]. Це яскраве втілення концепції Інтернету речей, яке знаходить застосування в усіх сферах – від промисловості та медицини до створення інтелектуального житлового простору [4].

У контексті «Розумного будинку» кіберфізична система виступає не просто як набір дистанційно керованих гаджетів, а як цілісна екосистема, спрямована на підвищення комфорту, безпеки та енергоефективності. Вона об'єднує управління усіма керуєваними функціями та комунікаціями будинку в єдиний інтелектуальний контур [5, 6]. Головною перевагою такої структури є здатність автоматизувати рутинні побутові процеси, позбавляючи мешканців необхідності постійного ручного контролю [7]. Система самостійно збирає дані, аналізує їх та приймає рішення згідно із заданими параметрами, забезпечуючи наочність управління та суттєву економію ресурсів.

Важливою рисою КФС «Розумний будинок» є її адаптивність та здатність функціонувати в умовах високої невизначеності. На відміну від класичних систем автоматизації, вона виступає активним суб'єктом прийняття рішень, що базується на глибокому аналізі контексту та сенсорної інформації [8]. Система не лише реагує на подразники, а й розпізнає складні ситуації, вибудовуючи логіку дій без прямого втручання людини. Це стає можливим завдяки здатності до самонавчання – накопичуючи дані про звички користувачів та зовнішні впливи, «Розумний будинок» постійно вдосконалює власні алгоритми реагування, стаючи більш стійким до збоїв.

Архітектурно така система базується на багаторівневій структурі, що охоплює шлях від фізичного рівня (сенсори, актуатори, контролери) до когнітивного висновку на основі функціонування кібернетичного (алгоритми прийняття рішень, база знань) та комунікаційного (мережі передачі даних) рівнів [9]. Сенсорний рівень відповідає за первинне сприйняття середовища (дим, газ, температура, виток води тощо), тоді як обчислювальний рівень забезпечує фільтрацію та передачу цих даних. Аналітичне ядро, використовуючи алгоритми прийняття рішень, класифікує стани та формує стратегію дій. Завершує цей цикл виконавчий рівень, де актуатори та реле перетворюють цифрові команди у фізичні дії, а когнітивно-комунікаційний модуль забезпечує зв'язок із користувачем через хмарні інтерфейси [10].

Сучасна парадигма КФС відмовляється від запрограмованої лінійної логіки на користь ситуаційної інтелектуалізації [11]. Це означає, що система сприймає дані не як окремі цифри, а як цілісні сценарії реальності [12]. Завдяки впровадженню технологій граничних обчислень (edge computing), обробка інформації відбувається безпосередньо в точках її збору, що мінімізує затримки та гарантує автономність будинку навіть за відсутності інтернету [13]. Модуль ситуаційного аналізу дозволяє виявляти аномалії в життєвими оселі, відрізняючи стандартні побутові процеси від потенційних загроз або аварійних випадків.

Особливою складністю проектування таких систем у житловому секторі є вплив людського фактора, який позбавлений жорсткого детермінізму. Тому КФС «Розумний будинок» має відповідати вимогам систем реального часу, де швидкість реакції на критичні події вимірюється частками секунди [14]. Вона повинна бути онтологічно відкритою, дозволяючи легко інтегрувати нові пристрої та сценарії без перебудови всієї архітектури. Зрештою, така система трансформується з технічного засобу в інтелектуального агента, що поєднує інженерну точність із когнітивною гнучкістю для забезпечення безпеки життєдіяльності.

Актуальність розробки підсистеми виявлення та запобігання аварійним ситуаціям у кіберфізичній системі «Розумний будинок» зумовлена стрімкою цифровізацією побутового простору та ускладненням інженерних мереж, що потребує автоматизованого контролю в режимі реального часу. Сучасне помешкання насичене великою кількістю енергоємних приладів, розгалуженими системами водопостачання та газозабезпечення, де найменша несправність або вихід параметрів за межі норми можуть призвести до катастрофічних наслідків, таких як пожежі, затоплення чи вибухи. У сучасному помешканні критично важливо забезпечити не просто моніторинг, а здатність системи миттєво ідентифікувати аномалії в роботі електромереж, водопостачання чи газового обладнання ще на стадії зародження проблеми, що дозволяє уникнути катастрофічних наслідків, таких як пожежі або затоплення.

Традиційні методи та засоби захисту, що базуються на автономних датчиках без централізованого інтелектуального управління, часто виявляються недостатніми, оскільки вони лише констатують факт аварії, не маючи можливості вчасно її попередити або мінімізувати збитки через превентивні дії. Впровадження кіберфізичних підходів дозволяє об'єднати фізичні процеси з обчислювальними алгоритмами, забезпечуючи не тільки моніторинг, а й глибокий аналіз даних для прогнозування потенційних загроз ще до їх фактичного виникнення, перетворюючи пасивне спостереження на активне запобігання через автоматичне перекриття клапанів чи знеструмлення небезпечних ділянок. Особливої ваги це набуває в умовах нестабільної роботи

енергосистем та зростання ризиків техногенного характеру, де швидкість реакції системи вимірюється мілісекундами, що критично для збереження життя мешканців та цілісності майна.

Крім того, актуальність підсистеми підкріплюється економічним аспектом, адже вартість ліквідації наслідків аварій значно перевищує витрати на розробку та впровадження інтелектуальних засобів захисту, які здатні самостійно перекрити подачу води чи газу в разі витoku. Розвиток технологій Інтернету речей та штучного інтелекту відкриває нові можливості для створення адаптивних систем, що здатні до самонавчання на основі поведінкових патернів користувачів, що робить таку підсистему фундаментом безпеки сучасного інтелектуального житла шляхом розпізнавання найменших відхилень від норми, які людина може не помітити.

Соціальна значущість підсистеми полягає у створенні безпечного та комфортного середовища для вразливих груп населення, таких як люди похилого віку або особи з обмеженими можливостями, для яких автоматизоване запобігання аваріям є життєво необхідною функцією, перетворюючи «Розумний будинок» з просто комфортного середовища на надійний інтелектуальний щит, здатний до самостійної діагностики та оперативного реагування в екстремальних умовах.

Таким чином, створення ефективної підсистеми виявлення та запобігання аварійним ситуаціям у кіберфізичній системі «Розумний будинок» є пріоритетним завданням, що відповідає сучасним тенденціям розвитку безпечних будинків та інтелектуальних систем життєзабезпечення.

Огляд відомих рішень щодо виявлення та запобігання аварійним ситуаціям у кіберфізичній системі «Розумний будинок»

Проведемо огляд відомих методів та рішень щодо виявлення та запобігання аварійним ситуаціям у кіберфізичній системі «Розумний будинок».

Якщо надзвичайна ситуація трапляється вдома у літньої людини, яка проживає сама, початок надання невідкладної допомоги може бути відкладено, що призводить до ще гірших наслідків для цієї групи населення. Розумні системи екстреного виклику вдома (HECS) можуть виявляти падіння та автоматично запускати екстрений сигнал тривоги, потенційно скорочуючи час до надання невідкладної допомоги та покращуючи результати. Окрім стандартної системи HECS з базовою станцією та портативним радіопередавачем, розумна система HECS включає датчики, які можуть виявляти падіння та автоматично вмикати сигнал тривоги [15, 16].

У статті [17] описано системи, спеціально розроблені для підвищення безпеки та незалежності людей з інвалідністю та людей похилого віку, які проживають вдома. Для таких людей негайна допомога в надзвичайній ситуації має вирішальне значення. Коротко обговорюється технічний стан систем екстреного виклику, спеціально розроблених для використання людьми похилого віку, зокрема добре відома радіокнопка екстреного виклику, за допомогою якої можна вручну активувати сигнал тривоги. Однак ця система не забезпечує належної безпеки у всіх надзвичайних ситуаціях. Тому пропонуються альтернативні або додаткові системи, призначені для автоматичного ввімкнення сигналу тривоги на основі запису та оцінки так званих життєво важливих параметрів. Крім того, в середовищі «Розумного будинку» з мережевими пристроями можна використовувати додаткові параметри – так звані параметри середовища. Виявлено, що ідентифікація надзвичайної ситуації стає більш надійною зі збільшенням кількості використовуваних параметрів.

Для літніх людей, які живуть самі, технічні рішення для виявлення надзвичайних ситуацій є важливими для швидкого отримання допомоги, коли це необхідно. Автори [18] представляють новий метод виявлення надзвичайних ситуацій у приватних домогосподарствах, який виявляє надзвичайно тривалі періоди бездіяльності та може обробляти помилкову або невизначену інформацію про активність. Вводиться показник неактивності, який забезпечує ймовірнісне зважування періодів бездіяльності на основі надійності вимірювань датчиків. Аналізуючи історичні показники неактивності, можна виявити аномалії, які потенційно представляють собою надзвичайну ситуацію.

Захист житлових районів все ще здійснюється за допомогою охоронців, які контролюють стан кожного будинку. Однак охоронці можуть охороняти лише зовнішню частину будинку, не знаючи про умови всередині. Тим часом система «Розумного будинку» є однією з технологій, яка продовжує розвиватися для моніторингу умов у будинку. У роботі [19] створено систему, яка може фактично контролювати стан кожного будинку, шляхом інтеграції технології та використання трьох основних датчиків – датчиків вогню, газу та руху. Ця система має переваги з точки зору встановлення гнучкого обладнання, яке можна налаштувати відповідно до потреб. Крім того, охоронці також можуть дізнаватися про умови в кожному будинку, а також отримувати актуальні сповіщення через розроблений застосунок. Система в будинку здатна надсилати інформацію про умови в ньому під час активації, включаючи небезпечні умови для активації сигналізації. З тестування обладнання видно, що чутливість вузла датчика вогню сильно залежить від кольору вогню, величини пожежі та відстані виявлення. Крім того, вузли датчиків газу можуть забезпечити швидку реакцію, якщо їх встановити поблизу джерела витoku.

У статті [20] описується проектування та впровадження пристрою Інтернету речей на базі ESP32-S3, який інтегрує моніторинг безпеки газу в режимі реального часу з голосовим помічником на базі штучного інтелекту, що забезпечує покращений зворотний зв'язок з користувачем та розмовний контекст. Основною метою системи є

поєднання голосової взаємодії в режимі "вільні руки" з великою мовною моделлю (LLM) та реальним виявленням газу MQ-2 для моніторингу безпеки навколишнього середовища. Прототип продемонстрував надійну продуктивність в обробці голосових запитів з контекстною пам'яттю та моніторингом навколишнього середовища. Ця робота ілюструє економічно ефективний та адаптивний підхід до розробки багатофункціональних рішень шляхом поєднання ESP 32 із сучасними хмарними сервісами штучного інтелекту та комплексними механізмами зворотного зв'язку з користувачами. Одночасно система проводить моніторинг навколишнього середовища за допомогою газового датчика MQ-2. При виявленні рівня газу, що перевищує заздалегідь визначений поріг, система запускає локальне голосове сповіщення через свій динамік, активує зумер та надсилає сповіщення через Telegram та мобільну панель керування Blynk, забезпечуючи своєчасне локальне та віддалене сповіщення.

В останні роки прогрес у технологіях «Розумного будинку» підкреслив необхідність розробки систем раннього виявлення пожежі та диму для підвищення безпеки та захисту. Традиційні методи виявлення пожежі, що базуються на теплових або димових датчиках, мають обмеження щодо часу реагування та адаптивності до навколишнього середовища. Для вирішення цих проблем у статті [21] представлено модель багатомасштабного інформаційного трансформатора–DETR (MITI-DETR), яка включає багатомасштабну ідентифікацію ознак на основі трансформатора, спеціально розроблені для виявлення пожежі в розумних будинках. Ця робота пропонує надійне рішення для раннього виявлення пожежі в розумних будинках, поєднуючи високу точність з можливістю розгортання в режимі реального часу.

Проект, описаний у [22], мав на меті впровадити застосування інтелектуальної пожежної сигналізації Arduino в реальних життєвих ситуаціях. Проект розпочався з дослідження та проектування архітектури системи перед створенням прототипу. Далі відбувалась розробка прототипу з використанням відповідних датчиків. Далі відбувалось програмування системи, де команди записуються у вигляді коду та виконуються для запуску прототипу. Було проведено чотири експерименти для перевірки ефективності прототипу пристрою, призначеного для моніторингу температури, вологості та концентрації газу в навколишньому середовищі. Система використовує різні датчики для виявлення пожеж та реагування на них у режимі реального часу, швидко їх локалізуючи та сповіщаючи служби екстреної допомоги. Запропонований метод є економічно ефективним та пропонує ефективне рішення для запобігання пожежам у «Розумних будинках».

Дослідження [23] зосереджено на розробці мобільного застосунку для системи «Розумного будинку» на базі Інтернету речей, здатного керувати побутовою технікою та подавати сигнал тривоги у разі пожежі та витоку газу. Дослідники використовували безкоштовний інструмент для створення веб-застосунків під назвою MIT App Inventor для створення застосунку та його функцій. Також для підключення застосунку до системи «Розумного будинку» використовувалась хмарна база даних Firebase. Кінцевим продуктом дослідження став мобільний застосунок для Android-пристроїв, здатний вмикати або вимикати побутову техніку та діяти як сигнал тривоги у разі пожежі або витоку газу в будинку.

У статті [24] пропонується система «Розумного будинку» на основі нечіткої логіки, яка виявляє ймовірність пожежі та активує екстрені сповіщення та дії. Система інтегрує принципи нечіткої логіки з інтелектуальними методами сенсорного зондування та прийняття рішень, які зменшують небезпеку пожежі в режимі реального часу. Ефективність та надійність системи демонструються за допомогою експериментів та оцінки. Результати досліджень підкреслюють потенціал використання підходів на основі нечіткої логіки для підвищення безпеки житлових приміщень та зменшення кількості інцидентів, пов'язаних з пожежами.

У дослідженні [25] автори пропонують нову структуру федеративного навчання (FL) для вирішення проблеми швидкого виявлення диму під час пожежі на межі середовищ «Розумного будинку». Запропонована структура використовує три різні алгоритми FL для глобальної агрегації прогнозів машинного навчання на основі даних з різних датчиків Інтернету речей. Ця структура дозволяє здійснювати раннє прогнозування, використовуючи обчислювальні можливості на межі, тим самим покращуючи швидкість реагування та ефективність систем пожежної безпеки.

Автори [26] розробили ефективне рішення для виявлення пожежі в «Розумних будинках» за допомогою методів обробки зображень та машинного навчання. FireD витягує ознаки з фотографій та захоплених відеокадрів за допомогою згорткової нейронної мережі (CNN) та надсилає їх до нейронної мережі, яка реалізує алгоритм кластеризації, відомий як Yolov5, щоб забезпечити можливість класифікації зображень як з пожежею та без пожежі. Після виявлення пожежі модель надсилає зображення до хмари Heroku, яка служить контейнерною хмарною платформою як послуга (PaaS) для доступу, розгортання та управління зображеннями. Про виявлення пожежі сповіщення надсилається до Telegram через Telegram-бот.

У роботі [27] представлено системну модель проектування та впровадження системи пожежної сигналізації, інтегрованої з Інтернетом речей (IoT) для раннього виявлення пожежі та реагування. Основною метою цієї роботи є покращення заходів пожежної безпеки шляхом використання технології IoT для виявлення пожеж на ранніх стадіях, що дозволяє оперативно діяти, мінімізуючи пошкодження майна та рятуючи життя. Запропонована система включає кілька датчиків, стратегічно розміщених у середовищі розумного будинку, для постійного контролю температури, рівня диму та CO. Реалізована модель включає ряд датчиків разом з візуальним індикатором на OLED та гучним зумером для попередження мешканців про потенційну пожежну небезпеку. Крім того, система запускає автоматичну систему водяного спринклера для

гасіння пожежі на попередніх стадіях. Інтеграція технології IoT дозволяє здійснювати моніторинг у режимі реального часу та дистанційний доступ до системи пожежної сигналізації. Зібрані дані з датчиків можуть бути передані на централізовану станцію моніторингу або доступні через мобільний застосунок, що полегшує дистанційний моніторинг, аналіз та контроль пожежної небезпеки. Результати дослідження демонструють потенціал системи пожежної сигналізації на базі IoT у покращенні заходів пожежної безпеки.

Аналіз сучасних методів та рішень у сфері виявлення та запобігання аварійним ситуаціям у кіберфізичній системі «Розумний будинок» свідчить про перехід від простих автономних датчиків до комплексних інтелектуальних систем, які поєднують моніторинг фізичних параметрів із просунутою аналітикою. Особлива увага в дослідженнях приділяється створенню систем екстреного виклику, що є критично важливим для безпеки літніх людей та осіб з інвалідністю. Розробки охоплюють широкий спектр технологій – від ймовірнісного зважування сенсорних даних до інтеграції голосових помічників на базі великих мовних моделей (LLM) та мультисенсорних вузлів для контролю витоків газу й вогню. Сучасні архітектури все частіше використовують мобільні застосунки та хмарні сервіси, такі як Telegram або Blynk, для миттєвого віддаленого сповіщення користувачів та охоронних структур про виникнення загрози. Важливим вектором розвитку є впровадження методів штучного інтелекту, зокрема нечіткої логіки, федеративного навчання та згорткових нейронних мереж (CNN) для візуального розпізнавання пожеж у реальному часі. Використання моделей типу MITI-DETR або алгоритмів YOLOv5 дозволяє значно підвищити точність детектування диму та вогню, мінімізуючи хибні спрацьовування та скорочуючи час реакції порівняно з традиційними тепловими детекторами. Крім того, спостерігається тенденція до створення закритих циклів реагування, де система не лише сповіщає про небезпеку, а й самостійно активує виконавчі механізми, такі як автоматичні спринклерні системи гасіння. Таким чином, сучасні кіберфізичні рішення трансформуються у когнітивні екосистеми, що здатні до багаторівневого аналізу середовища, забезпечуючи високу стійкість житла до техногенних та побутових аварій.

Аналіз існуючих рішень дозволяє виділити кілька критичних недоліків, які обмежують їхнє масове впровадження та ефективність у реальних умовах. Головним бар'єром залишається висока вартість інтелектуальних систем, особливо тих, що використовують складні нейромережеві моделі, дороге серверне обладнання або спеціалізовані когнітивні датчики, що робить повну автоматизацію безпеки недоступною для пересічного споживача. Крім того, більшість представлених на ринку та в наукових працях рішень мають вузькоспеціалізований характер, зосереджуючись на вирішенні лише однієї конкретної проблеми – наприклад, виключно на пожежній сигналізації. Такий фрагментарний підхід змушує власників житла встановлювати кілька незалежних підсистем від різних виробників, які часто несумісні між собою, створюють надмірне навантаження на мережу та потребують окремого обслуговування.

Саме тому постає гостра науково-технічна потреба у розробці єдиної комплексної підсистеми, яка б функціонувала як цілісний організм у межах кіберфізичного простору. Актуальним є створення універсального рішення, здатного одночасно здійснювати прецизійний моніторинг множини критичних параметрів – концентрації природного та чадного газів, появи диму, несанкціонованих витоків води, а також фіксації аномальних температурних коливань. Така багатфункціональність дозволить не лише знизити загальну вартість володіння системою, а й забезпечити синергетичний ефект, коли дані з одного датчика (наприклад, температури) допомагають підтвердити показники іншого (наприклад, диму), суттєво підвищуючи достовірність виявлення аварійних ситуацій. Проектування такої комплексної підсистеми і є метою даного дослідження.

Вибір апаратних складових підсистеми

Для побудови комплексної підсистеми важливо обрати датчики, які поєднують точність, довговічність та прийнятну ціну.

Датчики чадного газу (CO) працюють на різних принципах – напівпровідникові (дешевші, але споживають більше енергії) та електрохімічні (високоточні, ідеальні для автономних систем). У Таблиці 1 представлені результати порівняльного аналізу датчиків чадного газу.

Для розробки бюджетної, але надійної системи «Розумного будинку» для широкого вжитку, оптимальним вибором є MQ-7 (для прототипів та систем з живленням від мережі). Оскільки метою є побудова комплексної системи, то більше підходять датчики серії MQ, які мають схожу логіку підключення, що спростить проектування плати для моніторингу газу, диму та витоків одночасно.

Для моніторингу природного газу (метану CH₄) найчастіше використовують напівпровідникові датчики, які змінюють свій опір при контакті з молекулами газу. Оскільки метан легший за повітря, при проектуванні системи слід враховувати, що ці датчики мають розміщуватися у верхній частині приміщення. У Таблиці 2 наведені результати порівняльного аналізу датчиків природного газу, які найкраще підходять для інтеграції в кіберфізичну систему «Розумний будинок».

Таблиця 1

Порівняльний аналіз датчиків чадного газу

Модель датчика	Тип	Діапазон вимірювання (ppm)	Переваги	Недоліки	Орієнтовна вартість
MQ-7	Напівпровідниковий	10 – 1000	Дуже низька ціна, простота підключення до Arduino/ESP32	Потребує циклічного нагріву, високе енергоспоживання, чутливий до вологості	Низька
MQ-9	Напівпровідниковий	10 – 1000	Комбінований – реагує на CO та горючі гази (CH ₄ , LPG)	Менша точність саме по чадному газу порівняно з MQ-7	Низька
MG-811	Електрохімічний / Хімічний	350 – 10000	Висока чутливість, стабільність роботи	Висока ціна, складніша схема підключення	Середня
ME2-CO	Електрохімічний	0 – 1000	Висока точність, лінійна залежність сигналу, низьке енергоспоживання	Обмежений термін служби електроду (2-5 років)	Середня
FIGARO TGS5042	Електрохімічний	0 – 10000	Промисловий стандарт, висока селективність, довгий термін служби (до 10 років)	Висока вартість, потребує якісної обв'язки	Висока

Таблиця 2

Порівняльний аналіз датчиків природного газу

Модель датчика	Тип	Діапазон детектування (ppm)	Особливості	Енергоспоживання	Вартість
MQ-4	Напівпровідниковий (SnO ₂)	200 – 10000	Висока чутливість саме до метану (CH ₄), низька чутливість до диму	Високе	Низька
MQ-5	Напівпровідниковий	200 – 10000	Більш універсальний – реагує на метан та пропан-бутан (LPG)	Високе	Низька
MQ-9	Напівпровідниковий	100 – 10000	Гібридний – виявляє метан та чадний газ, проте з меншою точністю порівняно з MQ-7	Середнє	Низька
TGS2611	Напівпровідниковий	500 – 10000	Висока селективність до метану, компактний розмір	Середнє	Висока
MiCS-5524	MEMS (напівпровідниковий)	1000 – 10000	Сучасна технологія, дуже компактний, придатний для портативних пристроїв	Низьке	Середня

MQ-4 є «золотим стандартом» для бюджетних комплексних систем безпеки. Його головна перевага – вузька спеціалізація на метані, що зменшує кількість хибних спрацьовувань, коли на кухні готується їжа або використовуються миючі засоби. MQ-5 доцільно обирати лише в тому випадку, якщо в будинку використовується і природний газ (магістральний), і балонний (пропан), оскільки він ефективно «бачить» обидва види палива. TGS2611 рекомендується для систем преміум-класу, де пріоритетом є довговічність та стабільність показань без частих калібрувань. Отже, для нашої підсистеми оберемо в якості датчику природного газу саме датчик MQ-4.

Для комплексної системи безпеки вибір датчика диму є критичним, оскільки саме вони відповідають за раннє виявлення пожежі. У сучасних кіберфізичних системах використовуються переважно два типи – іонізаційні (швидко реагують на відкрите полум'я) та оптичні/фотоелектричні (краще розпізнають тління та

густий дим). У Таблиці 3 представлені результати порівняльного аналізу датчиків диму, які можна інтегрувати в систему «Розумний будинок».

Таблиця 3

Порівняльний аналіз датчиків диму

Модель датчика	Тип	Чутливість	Переваги	Недоліки	Вартість
MQ-2	Напівпровідниковий	Дим, LPG, пропан, водень	Універсальність, дуже низька ціна, простота обробки сигналу	Високе енергоспоживання	Низька
GP2Y1010AU0F	Оптичний (інфрачервоний)	Дрібні частки пилу та диму	Дуже низьке енергоспоживання, компактність, висока швидкість реакції	Потребує захисту від зовнішнього світла, чутливий до звичайного пилу	Середня
MAX30105	Оптичний (Particle Sensor)	Дим, дихання, частки	Надзвичайна точність (використовує ІЧ, червоний та зелений світлодіоди)	Складний протокол зв'язку (I2C), вища ціна	Висока
MQ-303A	Напівпровідниковий (MEMS)	Дим, пари спирту	Мініатюрний розмір, низьке енергоспоживання порівняно з серією MQ	Менша площа контакту з повітрям, потребує калібрування	Середня
DSM501A	Оптичний	Дим, пил (PM2.5)	Здатний розрізняти розмір часток	Габаритний корпус, потребує вертикального встановлення	Середня

MQ-2 – це оптимальний вибір для комплексного бюджетного рішення, оскільки він дозволяє одним модулем «закрити» питання і диму, і витоку горючих газів. Це значно здешевлює конструкцію, що відповідає вимозі щодо подолання дороговизни існуючих систем. Якщо ж пріоритетом є точність та уникнення хибних спрацювань, варто інтегрувати оптичний датчик типу GP2Y1010AU0F або DSM501A. Вони аналізують фізичну наявність часток у повітрі, а не хімічний склад, що робить їх надійнішими. Отже, для нашої підсистеми оберемо в якості датчику диму саме датчик MQ-2.

Для комплексної системи безпеки датчик витоку води є одним із найпростіших, але водночас критично важливих елементів. На відміну від газових сенсорів, вони зазвичай споживають мінімум енергії, оскільки працюють за принципом замикання контактів через провідне середовище (воду). У Таблиці 4 представлені результати порівняльного аналізу датчиків витоку води, які допоможуть запобігти затопленню.

Таблиця 4

Порівняльний аналіз датчиків витоку води

Модель датчика	Тип	Принцип роботи	Переваги	Недоліки	Вартість
HW-038 (Rain/Water Level)	Контактний (резистивний)	Вимірювання опору	Надзвичайно низька ціна, сумісність з усіма мікроконтролерами	Швидка корозія контактів (електроліз), потребує частої заміни	Дуже низька
YI-S (Зондовий)	Контактний (шуповий)	Два металеві шупи, що замикаються водою	Стійкість до корозії, легкість очищення, довговічність	Потребує безпосереднього контакту з калюжею певної глибини	Низька
Non-contact (Безконтактний)	Ємнісний	Виявлення води через стінку труби або резервуара	Не контактує з водою (немає корозії), висока надійність	Складніше налаштувати для виявлення розливу на підлозі	Середня
Optical Liquid Level	Оптичний	Відбиття/заломлення світла всередині призми	Висока точність, миттєва реакція, працює роками	Складніший у монтажі на плоскі поверхні (підлогу)	Середня
ХКС-Y25-T12V	Індуктивний / Ємнісний	Детектування рідини без прямого контакту	Безпека (немає оголених дротів), ідеально для агресивних середовищ	Чутливий до товщини поверхні, через яку «дивиться»	Висока

Найдешевшим є датчик HW-038, проте для реальної експлуатації в «Розумному будинку» він не підходить через швидке руйнування контактів під дією струму та вологи. Тому оптимальним вибором для комплексної підсистеми є зондові датчики (YI-S) з нержавіючими шупами або контактними пластинами, покритими золотом/нікелем. Вони дешеві, надійні та легко інтегруються в загальний аналітичний модуль. Щоб уникнути помилок тривоги через високу вологість, у програмне забезпечення комплексної системи варто додати алгоритм перевірки – сигнал вважається аварійним лише тоді, коли рівень сигналу з датчика тримається стабільно високим протягом 1-2 секунд.

Для комплексної системи безпеки датчик температури відіграє подвійну роль – він не лише забезпечує клімат-контроль, а й слугує критичним верифікатором пожежі. Якщо датчик диму фіксує задимлення, а температурний сенсор одночасно показує стрімке зростання температури більше 60°C, система може з майже 100% впевненістю ідентифікувати реальну пожежу, уникаючи помилок тривоги. В Таблиці 5 представлені результати порівняльного аналізу датчиків температури, придатних для детектування аномальних температур.

Таблиця 5

Порівняльний аналіз датчиків температури

Модель датчика	Тип	Діапазон температур	Точність	Переваги для системи безпеки	Вартість
DHT11 / DHT22	Цифровий (містить ємнісний сенсор вологості)	-40°C ... +80°C	±0.5 - 2°C	Вимірює і вологість, низька ціна	Низька
DS18B20	Цифровий (1-Wire)	-55°C ... +125°C	±0.5°C	Герметичний корпус (можна занурювати у воду), висока перешкодостійкість	Середня
LM35	Аналоговий	-55°C ... +150°C	±0.25°C	Пряма лінійна залежність 10 мВ/1°C, надзвичайно швидка реакція	Низька
BMP280 / BME280	Цифровий (I2C)	-40°C ... +85°C	±1°C	Додатково вимірює тиск, що дозволяє фіксувати зворотну тягу в димоходах	Середня
MLX90614	ІЧ-пірометр (безконтактний)	-70°C ... +380°C	±0.5°C	Дистанційне виявлення джерел тепла (може «побачити» вогонь здалеку)	Висока

Для виявлення (верифікації) пожежі найкращим вибором є DS18B20. Завдяки цифровому інтерфейсу 1-Wire, можна підключити десятки таких датчиків до одного піна мікроконтролера, розмістивши їх у кожній кімнаті. Його здатність працювати до +125°C дозволяє системі продовжувати передавати дані навіть у розпал аварії.

Для інтеграції обраного набору датчиків (MQ-7, MQ-4, MQ-2, YI-S та DS18B20) контролер повинен мати достатню кількість аналогових входів (для серії MQ) та цифрових інтерфейсів, а також підтримувати бездротовий зв'язок для миттєвого сповіщення користувача. У Таблиці 6 представлені результати порівняльного аналізу популярних платформ для створення кіберфізичних систем.

Таблиця 6

Порівняльний аналіз контролерів

Характеристика	Arduino Uno (R3/R4)	ESP8266 (NodeMCU)	ESP32 (DevKit V1)	STM32 (Black Pill)	Raspberry Pi Zero 2 W
Процесор	ATMega328P (8-біт)	ESP8266 (32-біт)	Dual-core (32-біт)	Cortex-M4	ARM Cortex-A53
Аналогові входи (ADC)	6 (10-біт)	1 (10-біт)	15+ (12-біт)	10 (12-біт)	Немає (потрібен АЦП)
Бездротовий зв'язок	Немає	Wi-Fi	Wi-Fi + Bluetooth	Немає	Wi-Fi + Bluetooth
Енергоспоживання	Низьке	Середнє	Середнє (є Deep Sleep)	Низьке	Високе
Обсяг пам'яті (Flash)	32 KB	4 MB	4 MB - 16 MB	512 KB	Залежить від SD-карти
Вартість	Низька	Дуже низька	Низька/Середня	Середня	Висока (дефіцит)

Для нашої комплексної підсистеми найкращим вибором є ESP32, оскільки він має велику кількість АЦП для датчиків MQ-7, MQ-4, MQ-2, що видають аналоговий сигнал. На відміну від ESP8266 (де вхід лише один) або Arduino (де їх 6, але низька розрядність), ESP32 дозволяє підключити всі газові датчики одночасно з високою точністю зчитування. ESP32 має вбудований Wi-Fi та Bluetooth, що є критично важливим для «Розумного будинку», оскільки не потрібно купувати додаткові модулі, щоб надсилати сповіщення про витоки газу чи пожежу на смартфон через мобільний застосунок або протокол MQTT. ESP32 має двоядерний процесор, який дозволяє розділити завдання – одне ядро займається постійним опитуванням датчиків у реальному часі, а інше – обробкою Wi-Fi з'єднання та шифруванням даних. ESP32 відмінно працює з протоколом 1-Wire (датчик DS18B20), тобто датчик температури можна підключити до будь-якого вільного цифрового піна. При високій потужності ESP32 залишається доступним за ціною, що відповідає концепції подолання дороговизни систем безпеки.

Для комплексної підсистеми кіберфізичної системи «Розумний будинок», яка базується на контролері ESP32 та групі датчиків безпеки, вибір стандарту передачі даних є критичним. Система має бути надійною, працювати в реальному часі та легко інтегруватися з мобільними пристроями. У Таблиці 7 представлені результати порівняльного аналізу основних стандартів передачі даних.

Таблиця 7

Порівняльний аналіз стандартів передачі даних

Стандарт	Радіус дії	Енергоспоживання	Пропускна здатність	Переваги	Недоліки
Wi-Fi (IEEE 802.11)	Середній (30-50 м)	Високе	Дуже висока	Пряме підключення до роутера та інтернету, не потрібен хаб	Залежність від стабільності роутера, енергозалежність
Zigbee / Z-Wave	Середній (10-100 м)	Дуже низьке	Низька	Стійка mesh-мережа, ідеально для датчиків на батареях	Потребує спеціальний шлюз (Gateway), вища ціна модулів
Bluetooth LE (BLE)	Малий (10-20 м)	Низьке	Середня	Економний, прямий зв'язок зі смартфоном	Обмежений радіус дії, складно керувати віддалено без шлюзу
LoRaWAN	Великий (до 5-15 км)	Дуже низьке	Дуже низька	Величезна дальність, робота в підвалах/бетонних спорудах	Повільна передача даних, складна інфраструктура

Для розроблюваної підсистеми оптимальним рішенням є використання протоколу MQTT (Message Queuing Telemetry Transport), що працює поверх Wi-Fi. Оскільки обраний контролер ESP32 вже має вбудований Wi-Fi модуль, це дозволяє реалізувати систему без додаткових витрат на шлюзи (як у випадку з Zigbee). Це повністю відповідає вимозі щодо бюджетності рішення. Wi-Fi забезпечує достатню швидкість для передачі великої кількості даних від багатьох датчиків одночасно. Протокол MQTT – це «золотий стандарт» для IoT-систем завдяки своїм особливостям: легкість (протокол мінімізує обсяг переданих даних, що важливо для швидкої реакції системи), надійність (MQTT має рівні якості обслуговування (QoS – Quality of Service); наприклад, для датчика газу можна встановити рівень «QoS 1», який гарантує, що повідомлення про аварію точно дійде до користувача), модель «Видавець-Підписник» (датчики публікують дані в певні «топіки» (наприклад, home/safety/gas), а смартфон або сервер негайно отримує їх), затримка передачі даних складає мілісекунди, що критично для запобігання пожежам чи вибухам.

На основі проведеного аналізу можна зробити висновок, що сформований перелік апаратних засобів є оптимальним для створення комплексної, бюджетної та високоефективної підсистеми виявлення та запобігання аварійним ситуаціям у кіберфізичній системі «Розумний будинок». Обрана конфігурація дозволяє подолати головні недоліки існуючих рішень – їхню високу вартість та вузьку спеціалізацію. Використання лінійки датчиків MQ-7, MQ-4 та MQ-2 у поєднанні з DS18B20 та YI-S дозволяє системі одночасно контролювати п'ять критичних загроз – чадний газ, природний газ, задимлення, аномально висока температура та витоки води. Це перетворює підсистему з простого детектора на повноцінний когнітивний вузол безпеки. Комбінація датчика диму MQ-2 та прецизійного термометра DS18B20 реалізує принцип перехресної перевірки. Це мінімізує кількість хибних спрацювань, що є ключовим показником надійності для кіберфізичних систем. Вибір ESP32 як обчислювального центру є найбільш виправданим. Завдяки вбудованому 12-бітному АЦП для точного зчитування аналогових сигналів газу та інтегрованому Wi-Fi модулю, контролер забезпечує високу швидкість обробки даних та миттєву передачу тривожних сигналів без

потреби в дорогому додатковому обладнанні. Використання стандарту Wi-Fi у поєднанні з протоколом MQTT гарантує низьку затримку (low latency) та високу надійність доставки повідомлень (QoS). Це критично для систем реального часу, де кожна секунда зволікання при аварії може мати серйозні наслідки. Застосування напівпровідникових та резистивних сенсорів у поєднанні з доступним контролером ESP32 робить підсистему в кілька разів дешевшою за промислові аналоги, зберігаючи при цьому необхідний рівень точності для побутового використання.

Отже, запропонований апаратний стек створює надійний фундамент для підсистеми виявлення та запобігання аварійним ситуаціям у кіберфізичній системі «Розумний будинок», яка здатна адаптуватися до мінливих умов середовища, забезпечувати автономний захист житла та надавати користувачу повний контроль над безпекою через сучасні цифрові канали зв'язку.

Підсистема виявлення та запобігання аварійним ситуаціям у кіберфізичній системі «Розумний будинок»

Отже, основні елементи підсистеми виявлення та запобігання аварійним ситуаціям у кіберфізичній системі «Розумний будинок»:

- 1) датчик чадного газу MQ-7;
- 2) датчик природного газу MQ-4;
- 3) датчик диму MQ-2;
- 4) датчик витоку води YI-S;
- 5) датчик аномально високих температур DS18B20;
- 6) контролер ESP32;
- 7) стандарт передачі даних – протокол MQTT, що працює поверх Wi-Fi.

Архітектура підсистеми виявлення та запобігання аварійним ситуаціям у кіберфізичній системі «Розумний будинок» складається з локального рівня – контролер ESP32 збирає дані з датчиків MQ-7, MQ-4, MQ-2, DS18B20 та YI-S, протоколу передачі – MQTT-клієнт на ESP32, хмарного/локального брокера – Mosquitto або безкоштовні хмарні сервіси (Adafruit IO, HiveMQ), кінцевий пристрій – смартфон із мобільним застосунком.

На нижньому рівні відбувається безпосереднє зчитування параметрів навколишнього середовища обраними датчиками. Ці фізичні компоненти збирають первинну інформацію, яка є основою для подальшого аналізу.

Зібрані дані передаються на середній рівень, центральним елементом якого є контролер ESP32. Контролер виконує роль мосту та первинного процесора – він отримує дані від датчиків. Після первинної обробки та перевірки, контролер використовує Wi-Fi-зв'язок та протокол MQTT для ефективної передачі даних на верхній рівень, що забезпечує мінімальний мережевий трафік та надійну інтеграцію у мережу будинку. Для всіх критично важливих повідомлень, що стосуються імплементації рішень, було встановлено рівень якості обслуговування QoS 1 (At least once).

На верхньому рівні розміщуються методи прийняття рішень та керування, які є аналітичним ядром та модулем ситуаційного аналізу підсистеми. Тут відбувається фінальний аналіз отриманих комплексних даних – застосовуються методи для розпізнавання поточних ситуацій та для визначення оптимальних дій відповідно до заздалегідь заданих правил, що містяться в розділі правил бази знань. Завершальним етапом роботи підсистеми є виконання необхідних дій в автоматичному режимі, спрямованих на попередження та запобігання аварійним ситуаціям. Це включає сповіщення користувача, перекривання подачі води/газу, сповіщення екстрених рятувальних служб тощо.

Спроектуюмо архітектуру підсистеми виявлення та запобігання аварійним ситуаціям у кіберфізичній системі «Розумний будинок» – рис. 1.

Розроблена підсистема виявлення та запобігання аварійним ситуаціям у кіберфізичній системі «Розумний будинок» забезпечує високий рівень безпеки завдяки комплексній інтеграції різнопланових сенсорів та алгоритмів обробки даних у реальному часі. Головними перевагами такої архітектури є її багатофункціональність, що дозволяє одночасно контролювати витoki газів, води та виникнення пожеж, а також економічна доступність за рахунок використання контролера ESP32 та недорогих напівпровідникових датчиків. Використання протоколу MQTT з рівнем якості QoS 1 гарантує надійність доставки критичних повідомлень, а багаторівнева структура прийняття рішень мінімізує вплив людського фактора та забезпечує оперативне автоматичне реагування на загрози. Разом з тим, система має певні обмеження, пов'язані із залежністю від стабільності Wi-Fi-з'єднання та необхідністю регулярного калібрування напівпровідникових сенсорів серії MQ, які схильні до деградації з часом і чутливі до змін вологості повітря. Проте, завдяки впровадженню методів ситуаційного аналізу та перехресної верифікації даних, підсистема трансформує житловий простір у когнітивне середовище, здатне ефективно запобігати техногенним аваріям та забезпечувати надійний захист майна і життя мешканців.

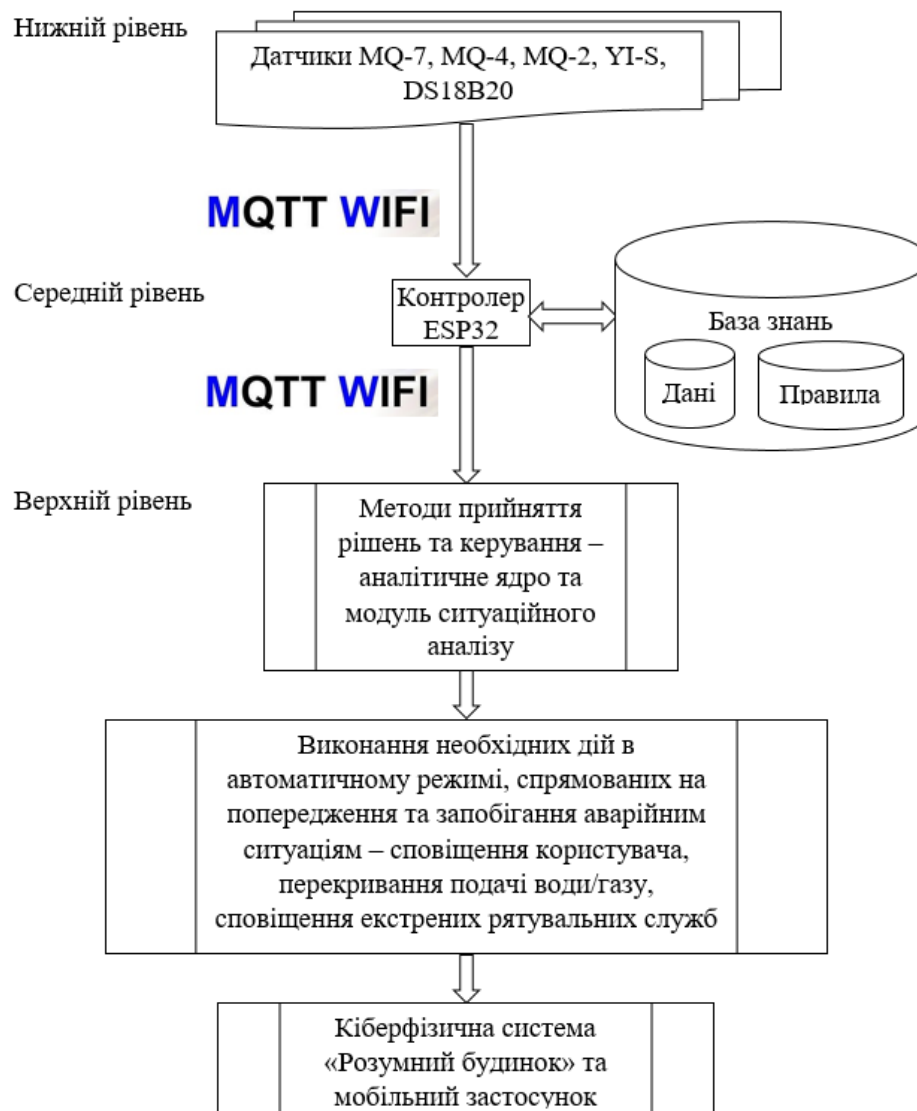


Рис. 1. Архітектура підсистеми виявлення та запобігання аварійним ситуаціям у кіберфізичній системі «Розумний будинок»

ВИСНОВКИ З ДАНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ І ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ РОЗВІДОК У ДАНОМУ НАПРЯМІ

Розроблена підсистема виявлення та запобігання аварійним ситуаціям у кіберфізичній системі «Розумний будинок» є ефективним та економічно доступним рішенням, яке долає обмеження вузькоспеціалізованих і дорогих аналогів. Завдяки інтеграції лінійки датчиків MQ-7, MQ-4, MQ-2, DS18B20 та YI-S під керуванням контролера ESP32, система забезпечує прецизійний моніторинг одночасно п'яти критичних загроз – витоків природного та чадного газів, появи диму, несанкціонованих витоків води та аномальних температурних коливань. Використання багаторівневої архітектури та протоколу MQTT поверх Wi-Fi з рівнем якості QoS 1 гарантує надійну передачу даних у реальному часі та оперативне автоматичне реагування на небезпеку, включаючи сповіщення користувача та перекриття відповідних комунікацій. Попри певні обмеження, пов'язані із залежністю від стабільності мережевого з'єднання та необхідністю калібрування сенсорів, впровадження методів ситуаційного аналізу та перехресної верифікації даних дозволяє трансформувати житловий простір у безпечне когнітивне середовище, що є життєво важливим для захисту мешканців, зокрема вразливих груп населення.

References

1. Resilient Distributed Optimization for Multi-Agent Cyberphysical Systems / M. Yemini et al. *IEEE Transactions on Automatic Control*. 2025. P. 1–16. URL: <https://doi.org/10.1109/tac.2025.3532791>.
2. Explainable AI for Cyber-Physical Systems: Issues and Challenges / A. Hoenig et al. *IEEE Access*. 2024. P. 1. URL: <https://doi.org/10.1109/access.2024.3395444>.
3. Cyber-Physical Systems in the Context of Industry 4.0: A Review, Categorization and Outlook / S. J. Oks et al. *Information Systems Frontiers*. 2022. URL: <https://doi.org/10.1007/s10796-022-10252-x>.

4. Fuada S., Hendriyana H. UPISmartHome V.2.0 – A Consumer Product of Smart Home System with an ESP8266 as the Basis. *Journal of Communications*. 2022. P. 541–552. URL: <https://doi.org/10.12720/jcm.17.7.541-552>.
5. Sung W.-T., Hsiao S.-J. Creating Smart House via IoT and Intelligent Computation. *Intelligent Automation & Soft Computing*. 2023. Vol. 35, no. 1. P. 415–430. URL: <https://doi.org/10.32604/iasc.2023.027618>.
6. Smart Home Personal Assistants: Fueled by Natural Language Processor and Blockchain Technology / S. A. Ansar et al. 2022 *Second International Conference on Interdisciplinary Cyber Physical Systems (ICPS)*, Chennai, India, 9–10 May 2022. 2022. URL: <https://doi.org/10.1109/icps55917.2022.00029>.
7. Yaici W., Entchev E., Longo M. Internet of Things (IoT)-Based System for Smart Home Heating and Cooling Control. 2022 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2022 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (IEEEIC / I&CPS Europe), Prague, Czech Republic, 28 June – 1 July 2022. 2022. URL: <https://doi.org/10.1109/eeeic/icpseurope54979.2022.9854634>.
8. Harnessing Real-Time Data for Intelligent Decision-Making in Cyber-Physical Systems / T. Premavathi et al. *Advances in Computer and Electrical Engineering*. 2024. P. 257–286. URL: <https://doi.org/10.4018/979-8-3693-5728-6.ch010>.
9. Azeri N., Hioual O., Hioual O. Towards an Approach for Modeling and Architecting of Self-Adaptive Cyber-Physical Systems. 2022 4th International Conference on Pattern Analysis and Intelligent Systems (PAIS), Oum El Bouaghi, Algeria, 12–13 October 2022. 2022. URL: <https://doi.org/10.1109/pais56586.2022.9946921>.
10. Cognitive architecture for cognitive cyber-physical systems / J. Al Haj Ali et al. *IFAC-PapersOnLine*. 2024. Vol. 58, no. 19. P. 1180–1185. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2024.09.099>.
11. Kluge T. A role-based architecture for self-adaptive cyber-physical systems. *SEAMS '20: IEEE/ACM 15th International Symposium on Software Engineering for Adaptive and Self-Managing Systems*, Seoul Republic of Korea. New York, NY, USA, 2020. URL: <https://doi.org/10.1145/3387939.3391601>.
12. Nota G., Petraglia G. Heritage buildings management: the role of situational awareness and cyber-physical systems. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*. 2024. URL: <https://doi.org/10.1007/s12652-023-04750-2>.
13. Edge-Computing-Driven Internet of Things: A Survey / L. Kong et al. *ACM Computing Surveys*. 2022. URL: <https://doi.org/10.1145/3555308>.
14. Design Procedure for Real-Time Cyber-Physical Systems Tolerant to Cyberattacks / C. M. Paredes et al. *Symmetry*. 2024. Vol. 16, no. 6. P. 684. URL: <https://doi.org/10.3390/sym16060684>.
15. Assessing the effectiveness and cost-effectiveness of a smart home emergency call system: study protocol for a randomised controlled trial in Germany / H. Rehse et al. *BMJ Open*. 2025. Vol. 15, no. 4. P. e092893. URL: <https://doi.org/10.1136/bmjopen-2024-092893>.
16. Smart Assistance of Elderly Individuals in Emergency Situations at Home / A. R. Reddy et al. *Internet of Things*. Cham, 2021. P. 95–115. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-030-63937-2_6.
17. Personennotrufsysteme auf Basis menschlicher vital- und systemtechnischer Parameter in einer Smart-Home-Umgebung / Emergency-call Systems Based on Human Vital and System-technical Parameters in a Smart-home Environment / M. Hampicke et al. *Biomedizinische Technik/Biomedical Engineering*. 2002. Vol. 47, no. 11. P. 278–284. URL: <https://doi.org/10.1515/bmte.2002.47.11.278>.
18. Wilhelm S., Wahl F. Emergency Detection in Smart Homes Using Inactivity Score for Handling Uncertain Sensor Data. *Sensors*. 2024. Vol. 24, no. 20. P. 6583. URL: <https://doi.org/10.3390/s24206583>.
19. Pramunanto E., Muhtadin M., Febrian W. Integrated Smart Safety Home System based on Wireless Sensor Network and Internet of Things as Emergency Preventive Efforts in Settlement Areas. 2019 International Conference on Computer Engineering, Network, and Intelligent Multimedia (CENIM), Surabaya, Indonesia, 19–20 November 2019. 2019. URL: <https://doi.org/10.1109/cenim48368.2019.8973328>.
20. Şevik R., Demirci R., Yılmaz Y. IoT-Powered Voice Interaction and Proactive Gas Leak Detection System for Smart Homes with Embedded Gas Sensing and Instant AI Alerts. 2025 Innovations in Intelligent Systems and Applications Conference (ASYU), Bursa, Türkiye, 10–12 September 2025. 2025. P. 1–8. URL: <https://doi.org/10.1109/asyu67174.2025.11208502>.
21. A Multi-Scale Approach to Early Fire Detection in Smart Homes / A. Abdusalomov et al. *Electronics*. 2024. Vol. 13, no. 22. P. 4354. URL: <https://doi.org/10.3390/electronics13224354>.
22. Development of Arduino based smart home fire alarm system with emergency SOS notification / K. R. Rajinran et al. *PROCEEDINGS OF 5TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON SUSTAINABLE INNOVATION IN ENGINEERING AND TECHNOLOGY 2023*, Kuala Lumpur, Malaysia. 2024. P. 020103. URL: <https://doi.org/10.1063/5.0229532>.
23. Paglinawan C. C., Bagunu R. A. D., Castillo S. T. Mobile Application for IoT-Based Smart Home System for Appliance Control and Fire Alert. 2024 16th International Conference on Computer and Automation Engineering (ICCAE), Melbourne, Australia, 14–16 March 2024. 2024. URL: <https://doi.org/10.1109/iccae59995.2024.10569777>.
24. Chrysafiadi K., Tschintzi E.-A., Sakkopoulos E. A smart home fuzzy logic-based cooking fire prevention system addressing human errors due to distraction or minor medical memory lapses. *Procedia Computer Science*. 2024. Vol. 246. P. 3390–3399. URL: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2024.09.218>.
25. A Trustable Federated Learning Framework for Rapid Fire Smoke Detection at the Edge in Smart Home Environments / A. N. Patel et al. *IEEE Internet of Things Journal*. 2024. P. 1. URL: <https://doi.org/10.1109/ijot.2024.3439228>.
26. Fired: An Image-Based Fire Detector for Smart Homes using Machine Learning Algorithms / G. M. Srinath et al. 2024 International Conference on Knowledge Engineering and Communication Systems (ICKECS), Chikkaballapur, India, 18–19 April 2024. 2024. P. 1–4. URL: <https://doi.org/10.1109/ickecs61492.2024.10616511>.
27. Debnath S., Gautam J., Rai S. K. IoT Based Smart Home and Office Fire Notification Alert System. 2024 IEEE International Conference on Interdisciplinary Approaches in Technology and Management for Social Innovation (IATMSI), Gwalior, India, 14–16 March 2024. 2024. URL: <https://doi.org/10.1109/iatmsi60426.2024.10503336>.