

<https://doi.org/10.31891/2219-9365-2025-84-3>

УДК 004.9

ГОВОРУЩЕНКО Тетяна

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0002-7942-1857>

e-mail: hovorushchenko@khmnu.edu.ua

АЛЕКСОВ Сергій

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0001-8764-675X>

e-mail: aleksov1212@gmail.com

ПІДСИСТЕМА РОЗПІЗНАВАННЯ СИТУАЦІЙ ТА ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ ЩОДО ОСВІТЛЕННЯ, МІКРОКЛІМАТУ ТА МУЛЬТИМЕДІА У КІБЕРФІЗИЧНІЙ СИСТЕМІ «РОЗУМНИЙ БУДИНОК»

Враховуючи проведений вибір компонентів (датчиків TSL2561, BME280, Max9814 та контролера ESP32), а також стандартів передачі даних I2C, Wi-Fi та MQTT, спроектовано архітектуру підсистеми розпізнавання ситуацій та підтримки прийняття рішень щодо освітлення, мікроклімату та мультимедіа у кіберфізичній системі «Розумний будинок». Розроблена підсистема розпізнавання ситуацій та підтримки прийняття рішень є інтегрованим технологічним ядром кіберфізичної системи «Розумний будинок» і забезпечує три ключові функції комфорту – керування освітленням, мікрокліматом (температурою та вологістю) та гучністю мультимедіа, причому робить це комплексно та узгоджено. Вона гарантує автоматичне створення та підтримання оптимального житлового середовища шляхом безперервного моніторингу, аналізу та взаємопов'язаного коригування всіх параметрів на основі єдиної бази правил. Ця підсистема може використовуватися для автоматичного енергозбереження (наприклад, вимкнення світла), для створення адаптивних сценаріїв комфорту (наприклад, ввімкнення зволожувача при сухому повітрі), для оперативного контролю безпеки та якості життя (наприклад, сповіщення про перевищення критичного рівня шуму), а також для оптимізації роботи мультимедійних систем (наприклад, автоматичне зменшення гучності мультимедіа у нічний час). Наукова новизна дослідження полягає у розробленні інтегрованої архітектури підсистеми розпізнавання ситуацій та підтримки прийняття рішень кіберфізичної системи «Розумний будинок», яка, на відміну від відомих рішень, що зосереджуються лише на одній групі функцій (наприклад, тільки мікроклімат), забезпечує комплексне й узгоджене керування трьома ключовими групами функцій житла (освітленням, мікрокліматом і мультимедіа), що гарантує автоматичне створення комфортного середовища шляхом одночасного аналізу та взаємопов'язаного коригування всіх параметрів на основі єдиної бази правил.

Ключові слова: кіберфізична система «Розумний будинок», датчики TSL2561, BME280, Max9814, контролер ESP32, стандарти передачі даних I2C, Wi-Fi та MQTT.

HOVORUSHCHENKO TETIANA, ALEKSOV SERHIY

Khmelnitskyi National University

SUBSYSTEM FOR SITUATION RECOGNITION AND DECISION SUPPORT REGARDING LIGHTING, MICROCLIMATE AND MULTIMEDIA IN THE CYBER- PHYSICAL SYSTEM "SMART HOME"

Considering the selected components (TSL2561, BME280, Max9814 sensors and ESP32 controller), as well as the I2C, Wi-Fi and MQTT data queuing standards, the architecture of the subsystem for recognizing situations and supporting decision-making regarding lighting, microclimate and multimedia in the cyber-physical system "Smart Home" has been designed. The developed subsystem for recognizing situations and supporting decision-making is an integrated technological core of the cyber-physical system "Smart Home" and provides three key comfort functions - controlling lighting, microclimate (temperature and humidity) and multimedia volume, and does so in a comprehensive and coordinated manner. It guarantees the automatic creation and maintenance of an optimal living environment through continuous monitoring, analysis and interconnected adjustment of all parameters based on a single rule base. This subsystem can be used for automatic energy saving (e.g., turning off the lights, lowering the heating, turning on the humidifier, etc.), for creating adaptive comfort scenarios (e.g., automatically adding light, increasing the temperature in the evening, or turning on the humidifier when the air is dry), for operational control of safety and quality of life (e.g., notifying about a sharp temperature jump or exceeding a critical noise level), as well as for optimizing the operation of multimedia systems (e.g., automatically reducing the multimedia volume at night). The scientific novelty of the research lies in the development of an integrated architecture of the situation recognition and decision support subsystem of the cyber-physical system "Smart Home", which, unlike known solutions that focus on only one group of functions (for example, only microclimate), provides comprehensive and coordinated control of three key groups of housing functions (lighting, microclimate, and multimedia), which guarantees the automatic creation of a comfortable environment through simultaneous analysis and interconnected adjustment of all parameters based on a single rule base.

Keywords: cyber-physical system "Smart Home", sensors TSL2561, BME280, Max9814, controller ESP32, data transmission standards I2C, Wi-Fi and MQTT.

Стаття надійшла до редакції / Received 30.10.2025

Прийнята до друку / Accepted 22.11.2025

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

«Розумний будинок» є сучасним житловим середовищем, яке організоване за допомогою автоматизації та високотехнологічних пристроїв, що об'єднуються в єдину інтелектуальну систему управління. Суть цієї системи полягає у забезпеченні узгодженої, автоматичної роботи інженерних мереж будинку, створюючи комфортні умови проживання [1]. Будинок називається «розумним», якщо в ньому наявна певна комп'ютерна чи контролююча система для управління інженерним оснащенням [2].

Ця система має бути спроектована таким чином, щоб усі сервіси могли легко інтегруватися між собою з мінімальними фінансовими, часовими та трудовими витратами, а їх обслуговування було оптимально організовано [3]. Інтелектуальна система грамотно розподіляє ресурси, знижує експлуатаційні витрати та забезпечує зрозумілий інтерфейс контролю і управління, а також повинна вміти розпізнавати конкретні заплановані та надзвичайні ситуації у помешканні та реагувати на них згідно із заданою програмою, причому одна система може керувати поведінкою інших. Важливою відмінною особливістю «розумного будинку» є те, що це найбільш прогресивна концепція взаємодії людини з житловим простором – мешканець обирає один із запрограмованих сценаріїв, а автоматизована (або й автоматична) система відповідно до зовнішніх і внутрішніх умов задає параметри і відстежує режими роботи всіх інженерних систем і електроприладів. Система керування функцій житла, як правило, складається з керування мікрокліматом, керування освітленням і керування системами мультимедіа. Незважаючи на широкий спектр функціональних призначень та численні операції, для управління цією потужною системою власнику житла не потрібні глибокі знання з програмування, оскільки усі сценарії наперед налаштовуються, а власникам залишається лише управляти функціями через пристрої з інтуїтивно зрозумілим інтерфейсом [4].

Проведений аналіз методів та засобів розпізнавання ситуації і підтримки прийняття рішень у кіберфізичній системі «Розумний будинок» виявляє широкий спектр підходів, зосереджених переважно на оптимізації енергоспоживання, створенні комфортного мікроклімату та підвищенні безпеки.

У сфері контролю мікроклімату та комфорту часто застосовуються інтелектуальні алгоритми. Наприклад, робота [2] використовує алгоритми нечіткої логіки для обчислення та коригування комфортних температур, визначаючи необхідні дії на основі оцінювання внутрішньої та зовнішньої температури за допомогою терм-множин (наприклад, «холодно», «тепло») і продукційних правил. Аналогічно, дослідження [5] підтвердило ефективність нечіткої логіки в поєднанні з багатокласовою машиною опорних векторів (SVM) для вибору правил управління температурою і вологістю. Впровадження системи моніторингу навколишнього середовища на базі Інтернету речей (IoT), розробленої в [6], використовує покращену оптимізацію роєм частинок (IPSO) для створення ідеального та комфортного середовища, включаючи модулі сенсорів температури, вологості та освітленості. Дослідження [7] зосереджене на методі керування з повним зворотним зв'язком і керуванням з випередженням для визначення найкращої теорії управління серводвигуном у системах розумних вікон, що покращує циркуляцію повітря. Крім того, робота [8] присвячена IoT-системі для управління опаленням та охолодженням, яка точно визначає необхідність корекції, запобігаючи втратам енергії.

Значна увага приділяється управлінню енергією та оптимізації витрат. Модель, запропонована у [9], використовує оптимізацію з рухомим горизонтом з прогнозуванням на основі рекурентної нейронної мережі для ітеративного прогнозування невизначеності та оптимізації роботи акумуляторних накопичувачів енергії в житлових розумних будинках, зокрема для ефективного використання сонячної енергії. Для управління енергоспоживанням у розумних будинках використовується стратегія [10] оптимізації домашнього енергоспоживання (ОНЕМ-алгоритм), заснована на покращеній бінарній оптимізації роєм частинок, що має на меті оптимізацію задоволеності клієнтів і вартості електроенергії. Дослідження [11] пропонує модель розумного багатоквартирного будинку, де множинні розподілені джерела живлення є спільними для кількох споживачів, що знижує експлуатаційні витрати та викиди вуглецю. Метод оптимального планування роботи побутових приладів для оптимального споживання енергії з урахуванням управління попитом і техніко-економічних показників в електромережах був запропонований у [12].

У сфері IoT-інтеграції та безпеки роботи зосереджуються на вдосконаленні інфраструктури та функціоналу. Дослідження [13] акцентує увагу на додаванні вузлів у IoT-інфраструктуру розумного будинку та реалізації системи на базі ESP-Mesh з різними типами вузлів (механічні замки, сенсори, вимикачі). Робота [14] представляє IoT-систему «розумної кухні» на базі Arduino, яка автоматично виявляє температуру, вологість і витік газу, а також надає можливість віддаленого керування приладами через мобільний телефон. Щодо безпеки, робота [15] розробила систему відмикання дверей на основі одноразового пароля (ОТР) за допомогою Arduino та GSM, що пропонує безпечнішу альтернативу традиційним ключам. Виявлення присутності/відсутності мешканців, важливе, наприклад, для догляду за літніми людьми, досліджувалося у [16] за допомогою кількох алгоритмів машинного навчання на основі аналізу використання електроприладів.

На додаток, дослідження пропонують методики для оцінки ефективності та спрощення розробки. Методологічний підхід, заснований на Emergy-аналізі, представлений у [17], призначений для оцінювання ефективності інтеграції IoT-сенсорних систем у розумні будівлі з метою зменшення впливу на довкілля та

енергоспоживання. Робота [18] пропонує метод розробки на основі TOPPERS Embedded-Component System для пристроїв з метою підвищення ефективності розробки електрообладнання, збільшення його масштабованості та зменшення складності. У сфері голосового керування [19] досліджується розробка системи домашньої автоматизації, що активується голосом і інтегрує штучний інтелект, IoT, обробку природної мови та блокчейн для ефективної та економічної взаємодії з побутовим обладнанням. Нарешті, в роботі [20] запропоновано новий метод на основі даних для точного непрямого обліку тепла в багатоквартирних будинках, що зменшує похибку рахунків за опалення.

Проведений огляд методів та засобів розпізнавання ситуації і підтримки прийняття рішень у кіберфізичній системі «Розумний будинок» виявив значні обмеження у наявних рішеннях. Ці недоліки зводяться до того, що і розпізнавання ситуацій, і підтримка прийняття рішень зазвичай реалізуються лише для однієї групи керованих функцій житла, або ж взагалі відсутні у деяких системах.

Виходячи з цього критичного аналізу, виникає нагальна потреба у розробці нових методів і засобів, які здатні виконувати як розпізнавання ситуацій, так і підтримку прийняття рішень для всіх трьох груп системи керованих функцій житла (мікроклімат, освітлення та мультимедіа). Ключовим завданням для подальшого розвитку цієї сфери є забезпечення повноцінного автоматичного прийняття рішень системою «Розумний будинок» без участі людини. Це вимагає від системи здатності самостійно визначати ситуації, вибирати найоптимальніше рішення з набору альтернатив та виконувати необхідні дії.

Тому, головною метою даного дослідження є проектування та розробка підсистеми розпізнавання ситуацій та підтримки прийняття рішень щодо освітлення, мікроклімату та мультимедіа у кіберфізичній системі «Розумний будинок».

Вибір компонентів для підсистеми розпізнавання ситуацій та підтримки прийняття рішень щодо освітлення, мікроклімату та мультимедіа у кіберфізичній системі «Розумний будинок»

Будь-яка кіберфізична система функціонує на трьох основних взаємопов'язаних рівнях. Нижній рівень є фізичним і складається з датчиків, які безпосередньо вимірюють різні параметри. Ці дані збираються на середньому рівні, який утворений системою контролерів. Контролери відповідають за збір отриманих від датчиків даних, їхню попередню обробку та передачу до центральної бази даних або відповідного програмного забезпечення для подальшого аналізу. Нарешті, верхній рівень є кібернетичним і представлений аналітичним програмним забезпеченням, яке обробляє отримані дані, проводить їхній глибокий аналіз, формує прогнози чи рекомендації та може використовувати складні алгоритми для автоматизації процесу прийняття рішень.

Основними параметрами, які буде визначати розроблювана підсистема кіберфізичної системи, будуть: освітленість приміщення (фізико-оптична величина, що характеризує відношення світлового потоку до площі поверхні, на яку він поширюється; вимірюється в люксах), температура повітря у приміщенні (вимірюється у градусах Цельсія), відносна вологість повітря у приміщенні (відношення масової частки водяної пари в повітрі до максимально можливої при даній температурі; вимірюється у відсотках), гучність звуку (вимірюється у акустичних децибелах – одиниця вимірювання рівня шуму з врахуванням сприйняття звуку людиною).

Проаналізуємо та порівняємо найпоширеніші типи датчиків, що використовуються для вимірювання освітленості приміщення. В системах «Розумного будинку» та автоматизації освітлення найчастіше застосовуються три основні категорії датчиків: фоторезистори, фотодіоди та фотоелементи на інтегральних схемах – Таблиця 1.

Аналіз різних типів датчиків освітленості для систем автоматизації виявляє чіткі відмінності у їхній придатності до конкретних завдань. Фоторезистори (LDR) є найбільш економічним варіантом і вирізняються надзвичайною простотою підключення. Однак їхні недоліки суттєво обмежують застосування у системах, що вимагають точних вимірювань: вони не підходять для визначення освітленості в люксах через нелінійність, повільний час відгуку та значну невідповідність їхньої спектральної чутливості сприйняттю людським оком. Як наслідок, LDR ідеально пасують лише для простих бінарних рішень, таких як визначення стану "світло/темно" для автоматичного ввімкнення вуличного або нічного освітлення.

На відміну від них, фотодіоди (і фототранзистори) демонструють швидший відгук і кращу лінійність, що є перевагою. Проте їхній основний недолік полягає в необхідності використання складнішої зовнішньої аналогової схеми для перетворення вихідного струму на напругу та для точної компенсації, щоб забезпечити коректне вимірювання в люксах.

Найбільш оптимальним вибором для «Розумного будинку» є фотоелементи на інтегральних схемах (люксметри). Хоча їхня вартість вища, ніж у LDR, вони надають високу точність і, що найважливіше, прямий цифровий вихідний сигнал в люксах через інтерфейс I2C, що значно спрощує інтеграцію та програмування. Ключова перевага цих ІС полягає у вбудованій корекції, яка максимально відповідає спектральній чутливості людського ока. Завдяки цьому, вони рекомендовані для всіх систем, де необхідне точне та надійне регулювання яскравості.

Таблиця 1

Порівняльний аналіз датчиків освітленості

Характеристика	Фоторезистор (LDR)	Фотодіод	Фотоелементи на інтегральних схемах (люксметри)
Принцип роботи	Зменшення електричного опору при збільшенні інтенсивності світла	Генерація електричного струму (або зміна опору в фототранзисторі) пропорційно інтенсивності світла	Інтегрований кремнієвий фотодіод і підсилювач, що часто включає аналого-цифровий перетворювач (АЦП)
Вихідний сигнал	Аналоговий (змінний опір). Потрібна зовнішня схема (наприклад, дільник напруги)	Аналоговий (струм або напруга)	Цифровий (I2C або SPI) або лінійний аналоговий
Точність та лінійність	Низька. Нелінійний, повільний час відгуку, значна залежність від температури	Висока. Добре лінійний діапазон, швидкий відгук	Дуже висока. Висока точність, лінійність, мінімальна залежність від температури, часто мають вбудовану корекцію під спектр людського ока
Спектральна чутливість	Зазвичай не відповідає спектру людського ока (потрібні фільтри для корекції)	Спектр близький до видимого світла, але часто вимагає корекції	Вбудована корекція за допомогою спеціальних фільтрів або подвійних фотодіодів (один для інфрачервоного світла, інший для видимого світла) для кращої відповідності кривій світлової ефективності
Діапазон вимірювання	Обмежений, переважно для простих застосувань типу «ввімкнути/вимкнути»	Широкий, але може вимагати складної схеми підсилення	Дуже широкий (від кількох міллюксів до десятків тисяч люксів), завдяки автоматичному масштабуванню
Складність інтеграції	Низька (проста аналогова схема)	Середня (потрібен точний підсилювач струму)	Низька (простий цифровий інтерфейс)
Вартість	Дуже низька	Низька/Середня	Середня

Для точного вимірювання освітленості в системах «Розумний будинок» найчастіше використовуються цифрові сенсори на інтегральних схемах, які забезпечують високу точність і калібрування. У Таблиці 2 наведено порівняння двох найбільш поширених датчиків – BH1750 та TSL2561.

Таблиця 2

Порівняльний аналіз датчиків BH1750 та TSL2561

Характеристика	Датчик BH1750 (ROHM)	Датчик TSL2561
Технологія	Кремнієвий фотодіод + АЦП	Два фотодіоди: один для видимого світла (Visible), інший – для інфрачервоного (IR)
Спектральна корекція	Висока. Вбудований оптичний фільтр, який добре імітує криву чутливості людського ока	Дуже висока. Вимірює видиме світло та інфрачервону складову окремо, а потім використовує програмний алгоритм для компенсації інфрачервоного випромінювання та точної імітації кривої чутливості людського ока
Вихідний сигнал	Цифровий	Цифровий
Діапазон вимірювання	Обмежений (менший): приблизно від 1 до 65535 лк.	Широкий (більший): приблизно від 0.1 до 40000+ лк (залежно від режиму). Краща чутливість при дуже низькій освітленості.
Роздільна здатність	0.5 – 4 лк (залежно від режиму)	0.1 лк (може бути вищою у різних режимах)
Режими роботи	Кілька режимів для вибору між точністю (висока роздільна здатність) та швидкістю (швидкий час вимірювання)	Три режими: низький, середній, високий. Дозволяє вимірювати як яскраве сонячне світло, так і тьмяну кімнатну освітленість
Енергоспоживання	Низьке. Має режим Power Down (сплячий режим)	Дуже низьке. Має режим Power Down та режим очікування, ідеально підходить для пристроїв з живленням від батарей
Типове застосування	Загальне управління освітленням, енергозбереження	Пристрої на батарейках, системи, що вимагають високої точності у широкому динамічному діапазоні (наприклад, професійні люксметри, точний моніторинг сонячного світла)

Обидва цифрові люксметри, BH1750 та TSL2561, є високоякісними рішеннями для систем «Розумного будинку», оскільки вони видають дані безпосередньо в люксах і мають вбудовану компенсацію,

значно перевершуючи прості аналогові сенсори. Проте, TSL2561 є технологічно досконалішим рішенням, що підтверджується його аналітичними перевагами. Зокрема, у питаннях точності та спектральної відповідності, TSL2561 використовує систему з двох фотодіодів (окремо для видимого та інфрачервоного світла), що дозволяє ефективніше відфільтровувати інфрачервону складову. Це критично важливо, оскільки частка інфрачервоного випромінювання у штучному та сонячному світлі різна, а точне вимірювання освітленості вимагає максимальної відповідності кривій світлової ефективності людського ока, яку TSL2561 забезпечує краще. Крім того, динамічний діапазон TSL2561 значно ширший – він здатний вимірювати як дуже низькі (у темному освітленні), так і дуже високі рівні освітленості завдяки змінним режимам посилення, що робить його більш гнучким для розміщення як у затемнених кутках, так і біля вікон. Додатковою перевагою TSL2561 є його енергоефективність, що робить його кращим вибором для пристроїв із батарейним живленням через оптимізовані режими низького споживання енергії. З іншого боку, BH1750 є простішим, надійнішим і економічно вигіднішим сенсором, що забезпечує достатню точність для більшості побутових завдань управління освітленням, де висока роздільна здатність у діапазоні менше 1 люкса не є критичною.

З огляду на необхідність високої точності для реалізації складних сценаріїв енергозбереження та автоматичної підтримки постійного рівня освітленості в умовах різного освітлення (від нічних ламп до сонячного світла), датчик TSL2561 є рекомендованим вибором для кіберфізичної системи «Розумний будинок». Його здатність точно вимірювати освітленість у широкому динамічному діапазоні та ефективно компенсувати інфрачервону складову гарантує, що система керування освітленням буде реагувати відповідно до реального сприйняття людського ока, забезпечуючи оптимальний комфорт та економію ресурсів.

Для вимірювання температури повітря у приміщенні в системах «Розумного будинку» та автоматизації мікроклімату найчастіше використовуються три основні типи електронних датчиків – термістори (NTC/PTC), цифрові датчики на інтегральних схемах та термопари (Таблиця 3).

Таблиця 3

Порівняльний аналіз датчиків температури

Характеристика	Термістори (NTC/PTC)	Цифрові датчики на інтегральних схемах	Термопари (тип К, J, T)
Принцип роботи	Зміна електричного опору залежно від температури (NTC – негативний, PTC – позитивний)	Використовують напівпровідникові переходи або інші ефекти на кристалі, результат перетворюється внутрішнім АЦП	Використовують ефект Зеебека – генерація напруги на стикі двох різних металів при різниці температур
Вихідний сигнал	Аналоговий (змінний опір/напруга). Потребує зовнішнього АЦП	Цифровий, видає дані безпосередньо у °C	Аналоговий (дуже мала напруга, мВ). Потребує підсилювача та компенсації холодного спаю
Точність (для кімнатної температури)	Середня/Висока. Потребує калібрування та лінеаризації	Дуже висока (до ± 0.1 °C для преміальних моделей). Калібрування заводу	Середня. Точність залежить від типу, але для кімнатної температури часто нижча, ніж у цифрових датчиків
Діапазон вимірювання	Обмежений (зазвичай від -50 °C до 150 °C)	Обмежений (зазвичай від -55 °C до 125 °C)	Надзвичайно широкий (від -200 °C до 2300 °C)
Складність інтеграції	Низька. Потрібен АЦП і складна формула лінеаризації	Дуже низька. Просте підключення, дані готові до використання	Висока. Потрібні спеціалізовані мікросхеми для підсилення
Вартість	Дуже низька	Середня	Середня/висока (з урахуванням необхідної електроніки)

Аналіз основних типів датчиків температури демонструє їхню різну придатність для використання у системах «Розумний будинок».

Термістори є найдешевшим варіантом, що є їхньою головною перевагою. Однак, їхня інтеграція ускладнена через аналоговий вихід і нелінійну залежність опору від температури, що вимагає використання зовнішнього аналого-цифрового перетворювача (АЦП) та складних обчислень для лінеаризації та отримання точного значення в градусах Цельсія. Ці технічні складнощі роблять їх не найкращим вибором для масових і простих у налаштуванні систем, хоча вони можуть застосовуватися у дуже простих контролерах, де вартість є критично важливою, а зниження точності є прийнятним. Термопари є промисловим стандартом, незамінним для вимірювання екстремально високих або дуже низьких температур завдяки надзвичайно широкому діапазону. Проте, їхня інтеграція є складною, оскільки вони генерують дуже малу напругу (мілівольти), що вимагає потужного підсилення, а також обов'язкового застосування компенсації холодного спаю. Для діапазону кімнатної температури їхня точність, як правило, нижча, ніж у інтегральних датчиків. Отже, термопари не підходять для стандартного моніторингу температури повітря у житлових приміщеннях, але є ідеальними для моніторингу високотемпературних процесів, наприклад, котла чи димоходу.

Цифрові датчики на інтегральних схемах визнані найкращим вибором для систем «Розумного будинку». Вони надають готовий цифровий сигнал безпосередньо в °C, що усуває необхідність у складному зовнішньому обладнанні та лінеаризації. Вони забезпечують дуже високу точність (часто краще, ніж $\pm 0.5^\circ\text{C}$) і низьку складність інтеграції, що є критичним для надійності та швидкого розгортання. Завдяки цим перевагам, цифрові датчики ідеально підходять для точного моніторингу температури повітря.

Аналіз найпопулярніших цифрових датчиків температури демонструє, що вибір оптимального рішення для системи «Розумний будинок» залежить від необхідного функціоналу, точності та вимог до енергоспоживання. Три найпоширеніші моделі – це спеціалізований термометр DS18B20 та комбіновані датчики навколишнього середовища DHT22 і BME280.

DS18B20 є еталоном, коли потрібне лише точне та надійне вимірювання температури. Його головною перевагою є використання протоколу 1-Wire, який дозволяє підключати велику кількість датчиків до одного мікроконтролерного виводу, значно спрощуючи монтаж і кабельні мережі у великих приміщеннях. Завдяки високій точності, що становить $\pm 0.5^\circ\text{C}$ у критичному діапазоні, а також можливості герметизації, він ідеально підходить для моніторингу температури повітря, а також для інтеграції у системи керування опаленням чи бойлерами.

Наступний, DHT22, пропонує привабливе рішення, поєднуючи вимірювання температури і вологості при відносно низькій вартості. Проте його функціональні переваги супроводжуються технічними компромісами. Датчик використовує власний, повільний протокол зв'язку, який вимагає точного таймінгу і робить його менш надійним та чутливим до помилок у порівнянні з іншими цифровими сенсорами. Хоча його точність по температурі зазвичай прийнятна, вимірювання вологості часто має меншу стабільність і може бути менш точним у довгостроковій перспективі.

BME280 (або його вдосконалені варіанти) представляє технологічно найдосконаліше рішення, що робить його оптимальним вибором для високопродуктивних систем. Він не лише вимірює температуру та вологість, але й додає третій параметр – атмосферний тиск. Ці комплексні дані є незамінними для просунутого клімат-контролю, дозволяючи системі не лише підтримувати комфорт, але й прогнозувати зміни погоди або точніше регулювати вентиляцію. BME280 використовує швидкі та надійні цифрові протоколи I²C або SPI, забезпечуючи високу точність і стабільність вимірювань. Крім того, його надзвичайно низьке енергоспоживання робить його ідеальним для бездротових, автономних пристроїв.

Хоча DS18B20 є беззаперечним лідером для великих, надійних мереж вимірювання лише температури, а DHT22 пропонує бюджетний компроміс, датчик BME280 є найкращим рішенням для комплексного управління мікрокліматом «Розумного будинку». Його висока точність, надійний цифровий інтерфейс та можливість триплексного вимірювання (температура, вологість, тиск) забезпечують максимальну кількість даних для інтелектуального прийняття рішень системою.

Для вимірювання відносної вологості повітря у приміщеннях систем «Розумного будинку» використовуються переважно два основні типи електронних датчиків – ємнісні та резистивні (гігromетри). Останнім часом домінує ємнісний принцип в інтегрованих цифрових рішеннях. Порівняльний аналіз датчиків відносної вологості повітря представлений у Таблиці 4.

Таблиця 4

Порівняльний аналіз датчиків відносної вологості повітря

Характеристика	Резистивні датчики (гігromетри)	Ємнісні датчики	Інтегровані датчики
Принцип роботи	Зміна електричного опору чутливого матеріалу (солі, полімери) залежно від поглинання водяної пари	Зміна діелектричної проникності полімерного шару між двома електродами під впливом вологості	Ємнісний сенсор + вбудований АЦП, калібрування та температурна компенсація
Вихідний сигнал	Аналоговий (змінний опір/напруга)	Аналоговий (змінна частота або ємність)	Цифровий (I ² C, SPI). Готові дані в %
Точність	Низька/середня ($\pm 5\%$ і вище)	Середня/висока ($\pm 2\%$ – $\pm 5\%$)	Дуже висока ($\pm 2\%$ – $\pm 3\%$). Заводське калібрування
Стабільність (довговічність)	Низька. Схильні до дрейфу та забруднення, вимагають частого калібрування	Вища. Краща стійкість до хімічних речовин та дрейфу	Висока. Краща довгострокова стабільність завдяки внутрішній корекції
Залежність від температури	Значна. Потребує складної зовнішньої температурної компенсації	Значна. Температурна компенсація критично необхідна	Мінімальна. Вбудована температурна компенсація
Швидкість відгуку	Повільна	Середня/висока	Висока
Вартість	Дуже низька	Середня	Середня

Аналіз датчиків відносної вологості повітря свідчить про докорінну різницю між застарілими та сучасними рішеннями. Резистивні датчики (гігromетри) є найпростішими та найдешевшими, однак їхній аналоговий вихід та низька довгострокова стабільність роблять їх непридатними для надійних систем «Розумного будинку», оскільки вони схильні до дрейфу показань і вимагають складної зовнішньої електроніки для лінеаризації та температурної компенсації. Через ці недоліки їхнє використання обмежується лише найпростішими індикаторами, де точність не є критичною. На противагу цьому, ємнісні датчики, інтегровані в цифрові мікросхеми, визнані найкращим вибором для сучасних систем. Вони успішно вирішують ключові проблеми, пропонуючи прямий цифровий вихід (через протоколи I²C/SPI) із готовими даними у відсотках відносної вологості. Критично важливою їхньою перевагою є вбудована температурна компенсація завдяки інтеграції термометра та алгоритму корекції, що є необхідним, оскільки відносна вологість безпосередньо залежить від температури. Це забезпечує високу точність і значно кращу стабільність порівняно з резистивними аналогами. Таким чином, оптимальним рішенням для точного клімат-контролю, керування зволожувачами/осушувачами та моніторингу якості повітря у «Розумному будинку» є використання цифрових інтегрованих датчиків ємнісного типу, які забезпечують високу надійність і простоту інтеграції.

Порівняємо три найпопулярніші моделі інтегрованих цифрових датчиків для вимірювання відносної вологості повітря у приміщеннях систем «Розумного будинку» – DHT22, SHT31 (як представник високоточних серій SHTx) та BME280 (як представник багатофункціональних сенсорів) – Таблиця 5.

Таблиця 5

Порівняльний аналіз датчиків DHT22, SHT31, BME280

Характеристика	DHT22	SHT31	BME280
Вимірювані параметри	Температура + відносна вологість	Температура + відносна вологість	Температура + відносна вологість + тиск
Точність вимірювання відносної вологості	±2%–5%	±2%	±3%
Інтерфейс	Власний (Single-Wire)	I ² C	I ² C/SPI
Швидкість/частота оновлення	Низька (мінімум 2 с між читаннями)	Висока (до 10 разів на секунду)	Середня/висока
Довгострокова стабільність	Середня/низька. Схильність до дрейфу	Висока. Дуже стабільний	Висока
Енергоспоживання	Середнє	Дуже низьке	Дуже низьке
Вартість	Низька	Висока	Середня

Аналіз популярних моделей цифрових датчиків вологості, а саме DHT22, SHT31 та BME280, виявив чіткий розподіл їхньої ефективності за критеріями ціна, точність та функціональність.

Найбільш бюджетний варіант, DHT22, виступає як компромісне рішення, пропонуючи подвійне вимірювання температури та вологості, але має суттєві недоліки – його точність відносної вологості є найнижчою (до ±5%), а використання повільного, пропріетарного протоколу знижує частоту оновлення та надійність, роблячи його придатним лише для некритичних додатків. Протилежним є датчик SHT31, який є еталоном високоточності, забезпечуючи найкращу точність (±2%) та найвищу довгострокову стабільність завдяки швидкому інтерфейсу і відмінному калібруванню. Проте його найвища вартість обмежує його застосування переважно преміальними або лабораторними системами. Золоту середину представляє BME280, який є найуніверсальнішим та оптимальним вибором для більшості систем «Розумного будинку». Він вимірює три ключові параметри (температуру, відносну вологість та тиск) одночасно, забезпечуючи чудовий баланс функціональності та надійності при помірній вартості. Хоча його точність ±3% трохи поступається SHT31, проте швидкий цифровий інтерфейс і дуже низьке енергоспоживання роблять його ідеальним для комплексного моніторингу мікроклімату і реалізації складних кліматичних сценаріїв. Таким чином, для більшості типових завдань датчик BME280 є рекомендованим оптимальним рішенням.

Датчики для вимірювання гучності звуку (рівня звукового тиску), що вимірюється у акустичних децибелах (дБА), які враховують сприйняття звуку людиною, переважно ґрунтуються на мікрофонній технології. У системах «Розумний будинок» найчастіше використовуються такі основні типи сенсорів – аналогові електретні мікрофони, цифрові MEMS-мікрофони та інтегровані модулі рівня шуму (Таблиця 6).

Аналіз датчиків звуку для систем «Розумного будинку» чітко розмежує їхню придатність залежно від кінцевої мети – вимірювання рівня шуму в акустичних децибелах (дБА) чи реєстрація самого аудіосигналу. Аналогові електретні мікрофони є найдешевшими та найпростішими фізично, але їхній аналоговий вихід робить їх найскладнішими для отримання точних показань дБА, оскільки це вимагає дорогих зовнішніх компонентів (підсилювачів, точних АЦП) та складного програмного забезпечення для перетворення і необхідного А-зважування. Через це їхнє використання обмежене лише простим виявленням присутності чи порогу звуку. Цифрові MEMS-мікрофони, хоча й забезпечують найкращу якість аудіосигналу

та високу стійкість до шумів, також видають необроблений аудіопотік. Програмне перетворення цих даних у надійні значення дБА є дуже ресурсоемним завданням для мікроконтролера, оскільки вимагає швидкої вибірки та складних математичних перетворень, що робить їх кращим вибором для запису аудіо та голосового керування, а не для моніторингу шуму. Як наслідок, оптимальним рішенням для «Розумного будинку», коли метою є саме вимірювання рівня гучності у дБА без запису звуку, є інтегровані модулі рівня шуму (SLM Modules). Ці модулі є найкращим вибором, оскільки містять усю необхідну електроніку на одній платі чи чипі. Це значно спрощує інтеграцію, забезпечує більш надійний та стабільний вихідний сигнал, який безпосередньо корелює з рівнем шуму, дозволяючи легко реалізовувати сценарії моніторингу шумового забруднення та автоматичного керування пристроями.

Таблиця 6

Порівняльний аналіз датчиків вимірювання гучності звуку

Характеристика	Аналоговий електретний мікрофон	Цифровий MEMS-Мікрофон	Модуль рівня шуму
Принцип роботи	Перетворення звукових хвиль у зміну ємності (електретний конденсатор), що генерує аналоговий сигнал напруги	Використання мікроелектромеханічної системи (MEMS) на кристалі для перетворення звуку, часто з вбудованим АЦП	Інтегрована система: мікрофон + підсилювач з автоматичним регулюванням посилення (API) + фільтри
Вихідний сигнал	Аналоговий (необроблена напруга). Потребує зовнішнього підсилення та АЦП	Цифровий (I ² S, PDM). Видає цифрові дані звуку	Аналоговий (підсилена напруга) або цифровий (оброблений сигнал)
Точність вимірювання	Низька. Точність залежить від якості зовнішньої схеми підсилення, фільтрації та калібрування	Середня. Вимагає складного ПЗ для перетворення цифрових даних у дБА (виконання А-зважування, фільтрації)	Висока. Модуль часто спроектований для вимірювання рівня, а не просто аудіосигналу
Спектральна відповідність	Відсутня. Потрібна складна програмна фільтрація (А-зважування)	Відсутня. Потрібна складна програмна фільтрація (А-зважування)	Часто вбудована або спрощена апаратна фільтрація
Складність інтеграції	Середня/висока. Потрібне оброблення аналогового сигналу	Середня. Потрібна підтримка мікроконтролером спеціалізованих цифрових інтерфейсів	Низька. Вихідний сигнал часто вже підсилений і спрощений
Вартість	Дуже низька	Середня	Середня/висока (залежно від функціоналу)

Для точного та надійного моніторингу рівня гучності в дБА у системах «Розумного будинку» використовуються спеціалізовані модулі, які інтегрують мікрофон, підсилювач та часто мають функцію автоматичного регулювання посилення. Порівняємо дві популярні категорії рішень, що використовуються у комерційних прототипах – модулі на базі Max9814 та модулі з лінійним аналоговим виходом (наприклад, на базі MAX4466) – Таблиця 7.

Аналіз датчиків для моніторингу гучності в системах «Розумного будинку» чітко вказує на те, що для досягнення цілей, пов'язаних із вимірюванням рівня шуму в акустичних децибелах (дБА), перевагу слід надавати інтегрованим модулям з автоматичним регулюванням посилення. Хоча модулі на базі MAX4466 з лінійним підсиленням є дешевшими та можуть забезпечити високу якість необробленого аудіосигналу, їхнє фіксоване посилення створює критичну проблему – вони не можуть ефективно працювати у широкому динамічному діапазоні. Це призводить до того, що тихі звуки можуть бути недостатньо розпізнані, а гучні – насичують (перевантажують) аналого-цифровий перетворювач, унеможливаючи точне вимірювання дБА. Крім того, вони вимагають складного програмного обчислення та калібрування. На противагу цьому, модулі на базі Max9814 є оптимальним рішенням для моніторингу шуму, оскільки їхня ключова функція автоматично адаптує посилення мікрофона до поточного рівня звуку. Ця особливість ефективно вирішує проблему широкого динамічного діапазону, гарантуючи, що сигнал завжди коректно масштабується в робочий діапазон напруги, незалежно від того, чи це тиха розмова, чи гучний крик. Як наслідок, вихідний аналоговий сигнал є більш надійним для перетворення в умовні дБА за допомогою мікроконтролера, що суттєво спрощує інтеграцію. Таким чином, для керування гучністю в «Розумному будинку» *інтегровані модулі рівня шуму на базі Max9814* є найкращим вибором, оскільки вони мінімізують складність апаратного та програмного забезпечення, необхідну для стабільного та надійного вимірювання рівня шуму.

Для інтеграції обраних датчиків – TSL2561 (освітленість), BME280 (температура, вологість) та модуля рівня шуму на базі Max9814 (гучність мультимедіа) – необхідно обрати контролер та стандарт передачі даних, які забезпечать надійність, швидкість та мінімальну складність інтеграції.

Перш за все, проаналізуємо інтерфейси, які використовують обрані датчики: TSL2561 використовує цифровий інтерфейс I²C, BME280 використовує цифровий інтерфейс I²C або SPI, Max9814 використовує аналоговий вихід. Оскільки два ключові датчики використовують I²C, а третій (Max9814) вимагає аналогового

входу, найбільш оптимальним стандартом зв'язку для більшості сенсорів буде I²C, а контролер повинен мати як мінімум один I²C порт та аналого-цифровий перетворювач (АЦП). Для керування «Розумним будинком» у цьому випадку найкраще підходять мікроконтролери з вбудованим Wi-Fi та потужними периферійними можливостями. Порівняємо дві найпопулярніші платформи – ESP32 та ESP8266 – Таблиця 8.

Таблиця 7

Порівняльний аналіз модулів на базі Max9814 та на базі MAX4466

Характеристика	Модуль на базі Max9814	Модуль на базі MAX4466
Принцип обробки	Мікрофон + автоматичне регулювання посилення	Мікрофон + високочастотний фіксований підсилювач
Вихідний сигнал	Аналоговий. Напруга, що автоматично масштабується під діапазон гучності	Аналоговий. Лінійна напруга, що відповідає амплітуді звуку
Головна перевага	Здатність працювати у дуже широкому динамічному діапазоні без насичення	Висока якість аудіосигналу та краща лінійність у вузькому діапазоні
Інтеграція в «Розумний будинок»	Дуже проста. Автоматичне регулювання посилення мінімізує потребу у складній програмній обробці	Складна. Потребує точного АЦП та програмної оптимізації для дБА
Вимірювання дБА	Досягається простіше. Модуль видає сигнал, який легше перетворити в умовні дБА	Складніше. Амплітуда сильно залежить від відстані та чутливості, вимагає складного калібрування
Призначення	Моніторинг рівня шуму (наскільки він гучний)	Якісний запис або голосове керування (що саме сказано)
Вартість	Середня	Низька

Аналіз вимог до контролера для обраного набору датчиків (TSL2561, BME280 та Max9814) однозначно вказує на те, що контролер ESP32 є оптимальним вибором. Його переваги базуються на вищій обчислювальній потужності та кращих периферійних можливостях порівняно з ESP8266. Передусім, для обробки аналогового сигналу з модуля рівня шуму Max9814, ESP32 оснащений 12-бітним багатоканальним аналого-цифровим перетворювачем (АЦП). Ця 12-бітна роздільна здатність, на відміну від 10-бітної у конкурента, забезпечує вищу точність і кращу деталізацію при перетворенні аналогової напруги в цифрове значення дБА, що є критичним для надійного моніторингу шуму. Крім того, його двоядерна архітектура дозволяє ефективно розподіляти завдання – одне ядро може бути виділене для складної обробки алгоритмів (наприклад, фільтрації чи перетворення звуку), не перевантажуючи ядро, відповідальне за роботу Wi-Fi та опитування інших сенсорів. Щодо цифрових сенсорів TSL2561 та BME280, обидва яких використовують I²C, наявність на ESP32 двох апаратних I²C портів підвищує гнучкість архітектури системи та дозволяє уникнути потенційних конфліктів адрес або перешкод, які часто виникають при програмній реалізації протоколу. Нарешті, універсальність ESP32 підкріплюється вбудованою підтримкою Bluetooth/BLE, що робить його ідеальним для безпосередньої взаємодії з мобільними пристроями, а також для інтеграції з іншими BLE-пристроями в екосистемі «Розумного будинку».

Таблиця 8

Порівняльний аналіз контролерів ESP32 та ESP8266

Характеристика	ESP8266 (наприклад, NodeMCU)	ESP32 (наприклад, ESP32 DevKit)
Кількість ядер	Одноядерний (80/160 МГц)	Двоядерний (до 240 МГц)
I ² C інтерфейси	Один апаратний порт (або програмна реалізація)	Два апаратних порти
Аналогові входи (АЦП)	Один 10-бітний канал	Багатоканальний 12-бітний АЦП
Бездротовий зв'язок	Wi-Fi (802.11 b/g/n)	Wi-Fi + Bluetooth/BLE (Dual-mode)
Обробка даних	Добре для простих завдань	Відмінно (може обробляти складні алгоритми, наприклад, FFT для звуку)
Енергоспоживання	Низьке	Низьке (з режимами глибокого сну)
Вибір для "Розумного будинку"	Підходить для одного пристрою (сенсор + реле)	Оптимально для комплексних систем та шлюзів

Аналізуючи необхідну архітектуру зв'язку для обраного контролера ESP32 і комплекту датчиків (TSL2561, BME280, Max9814), слід розрізнити локальний та мережевий стандарти передачі даних. Для локального зв'язку між контролером та цифровими сенсорами (TSL2561 та BME280) основним і найбільш обґрунтованим стандартом є I²C (Inter-Integrated Circuit), оскільки це його першочергове призначення – забезпечення надійного зв'язку між інтегральними схемами на одній платі або на короткій відстані. Щодо бездротової передачі зібраних комплексних даних (освітленість, температура, відносна вологість, рівень

шуму) до центральної системи управління, *Wi-Fi* (IEEE 802.11) є оптимальним стандартом, оскільки він забезпечує необхідну високу швидкість та можливість віддаленого доступу через вже існуючу домашню мережу. Поверх цього бездротового стандарту критично важливо використовувати *протокол MQTT* (Message Queuing Telemetry Transport). MQTT є найбільш ефективним протоколом додатків для архітектури «Розумного будинку» та Інтернету речей (IoT), оскільки він є легким і швидким, застосовуючи модель публікації/підписки. Це дозволяє мінімізувати мережевий трафік і гарантувати надійну доставку даних на центральний вузол, що є ключовим для енергоефективності та надійності системи. Таким чином, оптимальна архітектура зв'язку передбачає дволанкову схему – використання I²C для прямого підключення цифрових датчиків до ESP32 та використання Wi-Fi з протоколом MQTT для ефективної та надійної інтеграції даних в центральну систему управління.

Підсистема розпізнавання ситуацій та підтримки прийняття рішень щодо освітлення, мікроклімату та мультимедіа у кіберфізичній системі «Розумний будинок»

Підсистема розпізнавання ситуацій та підтримки прийняття рішень у кіберфізичній системі «Розумний будинок» – це інтегроване технологічне середовище, що поєднує фізичні компоненти (сенсори, контролери, виконавчі пристрої) з цифровими компонентами (програмне забезпечення та методи/алгоритми аналізу). Її ключова мета – забезпечити безперервний автоматичний контроль комфортності приміщення (освітлення, мікроклімат та мультимедіа). Система функціонує в режимі реального часу, охоплюючи всі етапи роботи – від зчитування параметрів середовища до прийняття рішень. Вона автоматично збирає, обробляє та аналізує інформацію, виявляючи відхилення від заданих нормативів, і обробляє ці результати з подальшим реагуванням.

Враховуючи проведений вибір компонентів (датчиків TSL2561, BME280, Max9814 та контролера ESP32), а також стандартів передачі даних I²C (Inter-Integrated Circuit), Wi-Fi (IEEE 802.11) та MQTT (Message Queuing Telemetry Transport), спроектуємо архітектуру підсистеми розпізнавання ситуацій та підтримки прийняття рішень щодо освітлення, мікроклімату та мультимедіа у кіберфізичній системі «Розумний будинок» – рис. 1.

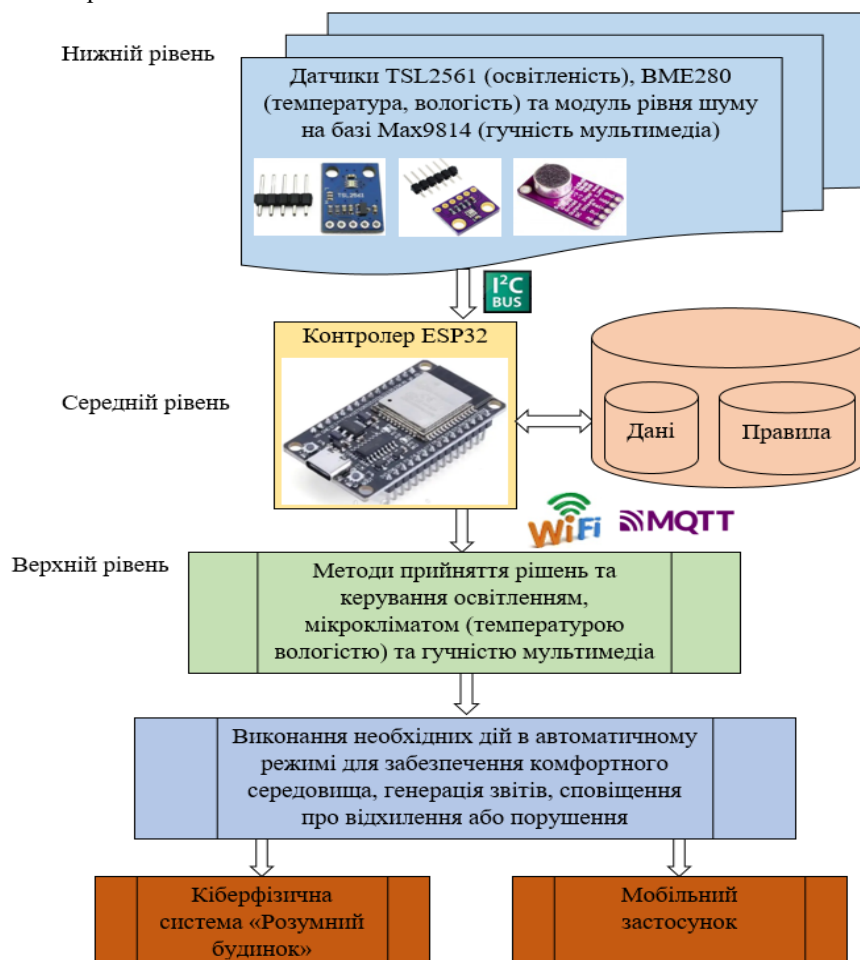


Рис. 1. Архітектура підсистеми розпізнавання ситуацій та підтримки прийняття рішень щодо освітлення, мікроклімату та мультимедіа у кіберфізичній системі «Розумний будинок»

Представлена архітектура описує функціонування інтегрованої підсистеми розпізнавання ситуацій та підтримки прийняття рішень для керування освітленням, мікрокліматом і мультимедіа у кіберфізичній системі «Розумний будинок», яка складається з трьох ключових рівнів – нижнього, середнього та верхнього.

На нижньому рівні відбувається безпосереднє зчитування параметрів навколишнього середовища за допомогою обраного комплексу сенсорів – датчик TSL2561 фіксує рівень освітленості, датчик BME280 вимірює температуру та відносну вологість, а модуль рівня шуму на базі Max9814 вимірює гучність мультимедіа. 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 цифрові дані від TSL2561 та BME280 через високошвидкісну шину I²C, а також зчитує аналоговий сигнал від Max9814 через свій 12-бітний АЦП. ESP32 не лише агрегує ці дані, але й використовує їх для формування бази знань, зокрема, її розділу даних. 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.

На верхньому рівні розміщуються методи прийняття рішень та керування, які є аналітичним ядром підсистеми. Тут відбувається фінальний аналіз отриманих комплексних даних – застосовуються методи для розпізнавання поточних ситуацій та для визначення оптимальних дій щодо керування освітленням, мікрокліматом (температурою та вологістю) та гучністю мультимедіа 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 забезпечення комфортного середовища. Це включає активацію виконавчих пристроїв (наприклад, ввімкнення освітлення, вимкнення зволожувача, зниження гучності мультимедіа тощо), генерацію звітів про роботу та, у випадку виявлення критичних відхилень або порушень, сповіщення користувача. Ці результати та сповіщення доставляються безпосередньо у кіберфізичну систему «Розумний будинок» для інтеграції з іншими підсистемами, а також у мобільний застосунок, який є інтерфейсом кіберфізичної системи «Розумний будинок», для контролю та взаємодії з користувачем.

ВИСНОВКИ З ДАНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ

І ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ РОЗВІДОК У ДАНОМУ НАПРЯМІ

1) Для проектування та розроблення підсистеми розпізнавання ситуацій у «Розумному будинку» був зроблений обґрунтований вибір компонентів, що забезпечують комплексний моніторинг середовища. Зокрема, для вимірювання освітленості обрано датчик TSL2561, який надає точні цифрові дані; для моніторингу ключових параметрів мікроклімату – датчик BME280, що комплексно вимірює температуру та вологість; для контролю гучності мультимедіа обрано модуль на базі Max9814, що вирішує проблему широкого динамічного діапазону шуму. В якості центрального контролера обрано ESP32, який є оптимальним завдяки своїй двоядерній архітектурі та 12-бітному АЦП, необхідному для точної обробки аналогового сигналу від Max9814 та виконання складних алгоритмів. Зв'язок у цій архітектурі реалізований на двох рівнях: для локальної взаємодії між цифровими датчиками TSL2561 та BME280 і контролером ESP32 використовується стандарт I²C, що забезпечує швидкий та надійний зв'язок на короткій відстані; для мережевої передачі зібраних даних до центральної системи управління обрано Wi-Fi (IEEE 802.11) з протоколом MQTT.

2) Розроблена підсистема розпізнавання ситуацій та підтримки прийняття рішень є інтегрованим технологічним ядром кіберфізичної системи «Розумний будинок» і забезпечує три ключові функції комфорту – керування освітленням, мікрокліматом (температурою та вологістю) та гучністю мультимедіа, причому робить це комплексно та узгоджено. Вона гарантує автоматичне створення та підтримання оптимального житлового середовища шляхом безперервного моніторингу, аналізу та взаємопов'язаного коригування всіх параметрів на основі єдиної бази правил. Ця підсистема може використовуватися для автоматичного енергозбереження (наприклад, вимкнення світла, зниження опалення, вимкнення зволожувача тощо), для створення адаптивних сценаріїв комфорту (наприклад, автоматичне додавання світла, підвищення температури у вечірній час або ввімкнення зволожувача при сухому повітрі), для оперативного контролю безпеки та якості життя (наприклад, сповіщення про різкий стрибок температури чи перевищення критичного рівня шуму), а також для оптимізації роботи мультимедійних систем (наприклад, автоматичне зменшення гучності мультимедіа у нічний час).

3) Наукова новизна дослідження полягає у розробленні інтегрованої архітектури підсистеми розпізнавання ситуацій та підтримки прийняття рішень кіберфізичної системи «Розумний будинок», яка, на відміну від відомих рішень, що зосереджуються лише на одній групі функцій (наприклад, тільки мікроклімат), забезпечує комплексне й узгоджене керування трьома ключовими групами функцій житла (освітленням, мікрокліматом і мультимедіа), що гарантує автоматичне створення комфортного середовища шляхом одночасного аналізу та взаємопов'язаного коригування всіх параметрів на основі єдиної бази правил.

References

1. Maslova M. "Smart House": bibliographic index. URL: <https://zounb.zp.ua/wp-content/uploads/2021/07/Rozumnij-budnok-pokazhchik-6.04.21-s-oblozhkoj.pdf>
2. Yurchak I., Vyshynskiy P. Application of Fuzzy Logic Algorithms in Smart Home Systems. Computer Systems and Networks. 2018. Vol. 905. Pp. 142-148. URL: <https://science.lpnu.ua/sites/default/files/journal-paper/2019/sep/18660/182073vis905ksmzvichniy-142-148.pdf>
3. Kukunin S. Development of a holistic methodology for the organization of "Smart House" type systems within the framework of the "Internet of Things" paradigm. Computer-integrated technologies: education, science, production. 2020. Vol. 38. Pp. 40-45. URL: <http://cit-journal.com.ua/index.php/cit/article/download/98/137>
4. Sribna I., Aleksandrov A. Interactive automatic system "Smart House". Communication. 2019. Vol. 3. Pp. 55-58. URL: <https://con.dut.edu.ua/index.php/communication/article/view/2401/2301>
5. Prediction of factors for Controlling of Green House Farming with Fuzzy based multiclass Support Vector Machine / K. Devi Thangavel et al. Alexandria Engineering Journal. 2022. URL: <https://doi.org/10.1016/j.aej.2022.07.016>
6. 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>
7. Ayu Lestari R., Yusmaniar Oktiawati U. Full state feedback and feed forward control of servo smart window using MATLAB/Simulink. Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science. 2022. Vol. 28, no. 3. P. 1355. URL: <https://doi.org/10.11591/ijeecs.v28.i3.pp1355-1362>
8. 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/iceic/icpseurope54979.2022.9854634>
9. Abedi S., Kwon S. Rolling-horizon optimization integrated with recurrent neural network-driven forecasting for residential battery energy storage operations. International Journal of Electrical Power & Energy Systems. 2023. Vol. 145. P. 108589. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2022.108589>
10. Home Energy Management System with Improved Binary PSO / A. Mohammad et al. Lecture Notes in Electrical Engineering. Singapore, 2022. P. 873-881. URL: https://doi.org/10.1007/978-981-19-4971-5_65
11. Optimal components capacity based multi-objective optimization and optimal scheduling based MPC-optimization algorithm in smart apartment buildings / K. Tamashiro et al. Energy and Buildings. 2023. Vol. 278. P. 112616. URL: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112616>
12. Optimal Energy Scheduling of Appliances in Smart Buildings Based on Economic and Technical Indices / I. Muda et al. Environmental and Climate Technologies. 2022. Vol. 26, no. 1. P. 561-573. URL: <https://doi.org/10.2478/rtuct-2022-0043>
13. 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>
14. Design and Implementation of Real-Time Kitchen Monitoring and Automation System Based on Internet of Things / C. A. U. Hassan et al. Energies. 2022. Vol. 15, no. 18. P. 6778. URL: <https://doi.org/10.3390/en15186778>
15. OTP-Based Smart Door Opening System / P. Srinivasan et al. Intelligent Communication Technologies and Virtual Mobile Networks. Singapore, 2022. P. 87-98. URL: https://doi.org/10.1007/978-981-19-1844-5_7
16. Lentzas A., Vrakas D. Machine learning approaches for non-intrusive home absence detection based on appliance electrical use. Expert Systems with Applications. 2022. P. 118454. URL: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2022.118454>
17. Kumar T., Srinivasan R., Mani M. An Emerygy-based Approach to Evaluate the Effectiveness of Integrating IoT-based Sensing Systems into Smart Buildings. Sustainable Energy Technologies and Assessments. 2022. Vol. 52. P. 102225. URL: <https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102225>
18. ECHONET Lite Framework Based on Embedded Component Systems / F. Qi et al. ECTI Transactions on Computer and Information Technology (ECTI-CIT). 2022. Vol. 16, no. 1. P. 74-83. URL: <https://doi.org/10.37936/ecti-cit.2022161.245976>
19. 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>
20. Smart sensors network for accurate indirect heat accounting in apartment buildings / Y. Stauffer et al. Journal of Building Engineering. 2022. Vol. 46. P. 103534. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jobte.2021.103534>