УДК 004.046 + 004.94

Є.В. ХОМЕНКО
Херсонський державний університет
С.А. БАБІЧЕВ
Університет Яна Євангеліста Пуркінє, Усті-над-Лабем, Чехія;
Херсонський державний університет

АВТОНОМНА IOT-СИСТЕМА МОНІТОРИНГУ МІКРОКЛІМАТУ АУДИТОРІЙ НА ОСНОВІ ВІДКРИТОЇ DIY-АРХІТЕКТУРИ

У статті представлено архітектурну модель автономної системи моніторингу мікрокліматичних параметрів навчального середовища, реалізовану на базі технологій інтернету речей (Internet of Things, IoT) із застосуванням відкритої DIY-архітектури (Do It Yourself). Рішення спрямоване на створення гнучкої, масштабованої та економічно доступної системи, яка забезпечує локальний збір, обробку та візуалізацію екологічних показників у режимі реального часу без залежності від зовнішніх хмарних сервісів. Система має трирівневу архітектуру: периферійний рівень включає мікроконтролери ESP32 з підключеними сенсорами температури, вологості та CO_2; серверна частина реалізована на базі PostgreSQL із розширенням TimescaleDB та RESTful API для збереження, верифікації та обробки даних; клієнтський рівень охоплює вебінтерфейс, розроблений за допомогою React і Chart.js, який надає інтерактивний доступ до динамічної візуалізації показників у прив'язці до нормативних меж (ISO 7730, ДБН В.2.5-67:2013). Актуальність дослідження зумовлена потребою в упровадженні недорогих, відкритих і безпечних інструментів для контролю параметрів мікроклімату в умовах обмеженого фінансування закладів освіти. Комерційні IoT-системи часто мають низку недоліків, серед яких — висока вартість, закритість архітектури, залежність від хмарної інфраструктури й обмеження в підтримці нестандартних конфігурацій сенсорів. Запропоноване рішення усуває ці обмеження, забезпечує повну автономність, локальне управління даними, високий рівень конфіденційності та можливість адаптації до специфіки окремих навчальних приміщень. Система також містить механізм автоматичного інформування про порушення нормативних параметрів, що дозволяє своєчасно виявляти потенційні загрози для здоров'я та ефективності освітнього процесу. Окрім прикладного значення, розробка має високий освітній потенціал, оскільки може використовуватись як платформа для навчання студентів у сферах мікроелектроніки, програмування, аналізу даних і безпеки IoT. Отримані результати підтверджують доцільність застосування відкритих апаратно-програмних рішень в освітній галузі та відкривають перспективи масштабування цієї системи для інших типів приміщень – офісних, лабораторних чи громадських просторів.

Ключові слова: *інтернет речей (IoT), моніторинг приміщень, система автоматизації, локальні методи автоматизації, інтелектуальний аналіз даних, оптимізація, ухвалення рішень.*

YE.V. KHOMENKO
Kherson State University
S.A. BABICHEV
Jan Evangelista Purkyně University, Ústi nad Labem, Czech Republic;
Kherson State University

AUTONOMOUS IOT-BASED CLASSROOM MICROCLIMATE MONITORING SYSTEM USING AN OPEN DIY ARCHITECTURE

The article presents the architectural model of an autonomous system for monitoring microclimate parameters in educational environments, implemented using Internet of Things (IoT) technologies based on an open Do It Yourself (DIY) architecture. The proposed solution is aimed at creating a flexible, scalable, and cost-effective system that enables local collection, processing, and real-time visualization of environmental indicators without relying on external cloud services. The system follows a three-tier architecture: the edge level includes ESP32 microcontrollers with connected sensors for temperature, humidity, and CO_2; the server level is implemented using PostgreSQL extended with TimescaleDB and a RESTful API for data storage, verification, and processing; and the client level includes a web interface developed using React and Chart.js, providing interactive access to data visualization in accordance with standard thresholds (ISO 7730, DBN V.2.5-67:2013). The relevance of this research is driven by the need to implement affordable, open, and secure tools for environmental monitoring in the context of limited funding for educational institutions. Commercial IoT systems often exhibit significant drawbacks such as high cost, closed architecture, dependence on cloud infrastructure, and limited support for non-standard sensor configurations. The proposed solution addresses these limitations by offering complete

https://doi.org/10.32782/mathematical-modelling/2025-8-1-24

autonomy, local data management, a high level of confidentiality, and adaptability to the specific requirements of individual classrooms. The system also includes a mechanism for automatic alerts in cases of regulatory parameter violations, allowing timely identification of potential risks to health and educational performance. In addition to its practical value, the proposed development has strong educational potential, serving as a platform for teaching students in the fields of microelectronics, programming, data analysis, and IoT security. The results confirm the feasibility of using open hardware and software solutions in education and highlight the prospects for scaling the system to other types of spaces, such as offices, laboratories, or public facilities.

Key words: *Internet of Things (IoT), indoor monitoring, automation system, local automation methods, data mining, optimization, decision-making.*

Постановка проблеми

Забезпечення комфортного мікроклімату в навчальних приміщеннях є важливою передумовою для підтримки ефективного освітнього процесу, збереження здоров'я учасників навчання та підвищення концентрації та працездатності студентів. За даними сучасних досліджень, параметри навколишнього середовища, зокрема температура повітря, вологість, рівень діоксиду вуглецю (CO_2) та освітленість, мають безпосередній вплив на когнітивні функції, самопочуття та загальну продуктивність у класах. У зв'язку із цим зростає потреба в інтеграції сучасних технологій, зокрема інтернету речей (Internet of Things (далі – IoT)), для безперервного й автоматизованого моніторингу параметрів мікроклімату.

Нині в освітній сфері застосовуються переважно комерційні IoT-системи для моніторингу умов середовища. Такі рішення зазвичай пропонують готові модулі з фіксованою конфігурацією сенсорів, централізованим зберіганням даних у хмарі та пропрієтарним програмним забезпеченням. До переваг цих систем належать високий ступінь інтеграції, зручність установки та підтримка від виробників. Однак досвід їх використання в навчальних закладах виявляє низку істотних обмежень.

Зокрема, ключовими недоліками наявних комерційних рішень є: висока вартість володіння, що включає придбання обладнання, абонплату за хмарне зберігання і обслуговування; обмежена адаптивність, тобто відсутність підтримки користувацьких конфігурацій сенсорів, які можуть бути важливими в конкретному навчальному середовищі; залежність від зовнішніх хмарних інфраструктур, що породжує ризики витоку конфіденційної інформації, а також ускладнює роботу в автономному режимі; відсутність локального контролю над обробкою та візуалізацією даних, що обмежує можливості закладу щодо гнучкого налаштування аналітики й інтерфейсів.

У контексті зростання вимог до безпеки даних, енергоефективності й економії бюджетних коштів актуальним постає впровадження альтернативних, відкритих рішень на базі мікроконтролерів нового покоління, зокрема ESP32. Такі підходи дозволяють створювати автономні системи з локальним зберіганням і обробкою даних, можливістю адаптації під специфіку навчального закладу, а також сприяють формуванню цифрових компетентностей у студентів.

Пропозиція авторів полягає в розробці та реалізації трирівневої IoT-системи моніторингу мікроклімату навчальних аудиторій, яка ґрунтується на відкритій DIY-архітектурі. Система включає крайові пристрої на базі ESP32 з підключеними сенсорами, серверну частину для локальної обробки та зберігання даних, а також вебінтерфейс для інтерактивної візуалізації показників. Особливу увагу приділено забезпеченню автономності, масштабованості, безпеки інформаційних потоків і відповідності гігієнічним стандартам. Запропоноване рішення має на меті подолати наявні обмеження комерційних систем і надати освітнім закладам ефективний інструмент для контролю та оптимізації умов навчального середовища.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Сучасна наукова література демонструє зростання інтересу до використання технологій інтернету речей (Internet of Things, IoT) у сфері освіти, зокрема для моніторингу навчального середовища та підвищення його якості. У дослідженні [1] представлено концепцію «розумної освіти», у якій IoT-технології виступають засобом збору даних про умови у класах і адаптації

https://doi.org/10.32782/mathematical-modelling/2025-8-1-24

освітнього процесу відповідно до індивідуальних потреб учнів. Однак, незважаючи на перспективність такого підходу, автори зосереджуються переважно на загальних концептуальних засадах без конкретної реалізації технічної інфраструктури, зокрема автономних систем, придатних до локального використання.

У [2] автори акцентують увагу на технічному аспекті впровадження IoT, презентують практичний приклад використання ESP32 як основи для створення модульних і недорогих пристроїв. Хоча дослідження демонструє ефективність ESP32 як апаратної платформи, у ньому обмежено розглядаються аспекти безпеки, візуалізації даних і нормативної відповідності систем. Окрім того, відсутні приклади застосування у специфічному освітньому контексті.

У [3] розглядається роль граничних (edge) обчислень у зниженні затримок і підвищенні надійності IoT-систем. Незважаючи на глибокий аналіз архітектурних моделей, у роботі не надано реалізаційних прикладів, які демонстрували б локальну автономність без використання хмарних сервісів у реальному освітньому середовищі.

Ще один важливий аспект пов'язаний із нормативними вимогами до мікроклімату. Стандарт ISO 7730:2005 установлює параметри, необхідні для забезпечення теплового комфорту, однак його інтеграція із системами моніторингу в освітньому контексті практично не розкрита в наявних дослідженнях [4]. Дослідження [5] підтверджує позитивний вплив якісного повітря на когнітивну продуктивність учнів, що підсилює важливість екологічного моніторингу в навчальних закладах, проте не містить технологічного інструментарію реалізації таких систем.

У [6] розглянуто переваги поєднання edge- та cloud-технологій для смарт-класів. Проте така гібридна архітектура не вирішує проблему повної автономності, що є критично важливою в умовах обмеженого або нестабільного доступу до інтернету.

Питання безпеки даних у середовищі IoT є предметом досліджень у [7; 8]. Автори вказують на численні вразливості сучасних IoT-пристроїв і загрози використання хмарних сервісів. Водночас більшість досліджень зосереджені на загальних кіберзагрозах і не пропонують конкретних механізмів захисту, реалізованих у системах з локальною архітектурою.

У роботі [9] представлено огляд упровадження IoT у школах, із наголосом як на перевагах (персоналізація, адаптивність, покращення умов навчання), так і на бар'єрах (технічна неготовність персоналу, фінансові обмеження, потреба в міждисциплінарній співпраці). Однак практичні рішення, які б дозволяли подолати ці бар'єри за допомогою відкритих, економічних і безпечних систем, залишаються не досить висвітленими.

Але варто зазначити, що хоча наявні дослідження охоплюють широкий спектр аспектів IoT в освіті – від архітектури до соціального впливу, більшість із них або фокусуються на концептуальних моделях без глибокої реалізації, або пропонують хмароорієнтовані рішення, що не відповідають вимогам автономності, конфіденційності та гнучкості для бюджетних освітніх закладів. Невирішеною залишається проблема створення доступної, масштабованої та безпечної IoT-системи з локальною обробкою даних, адаптованої до умов реального навчального процесу. Саме цьому завданню присвячене дане дослідження.

Мета дослідження

Метою дослідження є розроблення, обґрунтування та моделювання архітектури автономної системи моніторингу параметрів мікроклімату навчального середовища на основі технологій інтернету речей (IoT) із використанням відкритої DIY-архітектури. Запропонована система спрямована на усунення обмежень наявних комерційних рішень, зокрема високої вартості, залежності від хмарних платформ, відсутності гнучкості адаптації до специфічних сенсорних конфігурацій і ризиків, пов'язаних із конфіденційністю даних. Основна увага приділяється створенню трирівневої модульної інфраструктури з локальним збором, обробкою та візуалізацією даних у режимі реального часу, що забезпечує автономність функціонування, масштабованість і відповідність нормативним вимогам до мікроклімату в освітніх закладах.

https://doi.org/10.32782/mathematical-modelling/2025-8-1-24

Виклад основного матеріалу дослідження

Блок-схему запропонованої моделі функціональної структури системи моніторингу показників зображено на рис. 1.

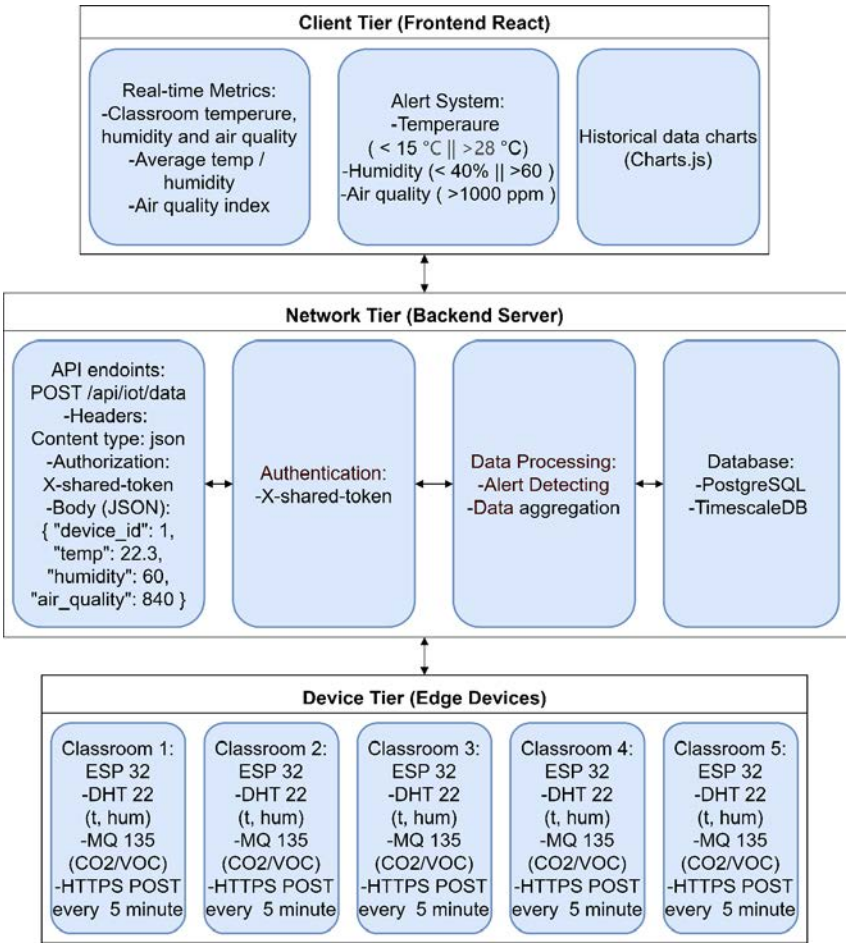

Рис. 1. Блок-схема функціональної структури системи моніторингу показників

Розроблена система моніторингу мікроклімату в освітньому середовищі реалізована як трирівнева архітектура, яка включає:

1. *Периферійний рівень (Edge Devices)* – відповідає за збір первинних екологічних даних.
2. *Мережевий рівень (Backend Server)* – забезпечує обробку, зберігання і аналіз отриманої інформації.
3. *Клієнтський рівень (Client Tier)* – надає інтерфейс доступу користувачів до результатів моніторингу.

Запропонована архітектура забезпечує масштабованість, розподіл обчислювальних навантажень і мінімізацію затримок передачі даних, що є критично важливим для систем реального часу.

На периферійному рівні реалізовано вузли збору даних на базі мікроконтролерів *ESP32*, розміщених безпосередньо в навчальних аудиторіях. Кожен вузол обладнано цифровим сенсором *DHT22* для вимірювання температури повітря та відносної вологості, а також газовим сенсором *MQ-135*, який здійснює оцінювання якості повітря за концентрацією діоксиду вуглецю (CO_2) та летких органічних сполук (VOC).

Зібрані дані агрегуються у форматі *JSON* із дотриманням уніфікованої структури, що забезпечує ідентифікацію пристрою, контекст розміщення (будівля, аудиторія) та тип призначення приміщення. JSON-пакети формуються за допомогою бібліотеки *ArduinoJson* і передаються на

https://doi.org/10.32782/mathematical-modelling/2025-8-1-24

центральний сервер через захищений HTTPS-канал із використанням модуля *WiFiClientSecure*. Ідентифікація запитів здійснюється за допомогою заголовка *X-SHARED-TOKEN*, що забезпечує базову автентифікацію вузлів. У тестовому режимі використовується спрощене з'єднання без верифікації SSL-сертифіката (*client.setInsecure()*), яке може бути замінене на повноцінне TLS-з'єднання у виробничому середовищі.

Періодичність передачі даних програмно налаштовується; у поточній реалізації вимірювання відбувається кожні 5 хвилин. Такий режим сприяє зниженню енергоспоживання, зменшенню навантаження на мережу та забезпечує оперативне відстеження змін мікрокліматичних показників.

Мережевий рівень відіграє ключову роль у функціонуванні IoT-системи, оскільки забезпечує централізовану обробку, зберігання та верифікацію даних, отриманих із периферійних пристроїв. Передача інформації здійснюється через *REST API*, захищений механізмом токен-автентифікації типу *X-SHARED-TOKEN*, що гарантує базовий рівень безпеки без потреби у складних схемах авторизації (наприклад, OAuth).

Для зберігання даних використовується реляційна система керування базами даних *PostgreSQL*, розширена модулем *TimescaleDB*, який оптимізовано для обробки часових рядів. Такий підхід дає змогу виконувати операції агрегації, фільтрації, сегментації та аналізу великого обсягу даних у реальному часі з мінімальними затримками.

Архітектура серверного рівня включає низку функціональних модулів, зокрема:

– приймання та збереження даних із HTTP-запитів;

– виявлення аномальних значень, що перевищують нормативні межі (відповідно до ISO 7730, ДБН тощо);

– генерацію системних сповіщень у разі фіксації критичних відхилень (наприклад, CO_2 > 1 000 ppm або температура <18 °C);

– обслуговування запитів клієнтської частини для побудови графіків і звітів.

Для реалізації серверної логіки доцільним є використання вебфреймворку *Django* (мова програмування – Python), який забезпечує зручне управління ORM-моделями, швидку побудову *RESTful API* через *Django REST Framework*, а також інтеграцію з потужними аналітичними бібліотеками (наприклад, *Pandas*, *NumPy*, *Scikit-learn*). Це сприяє ефективній обробці даних і дозволяє гнучко модифікувати систему відповідно до змін вимог.

Клієнтський рівень реалізовано за допомогою фреймворку *React*, який забезпечує динамічний та інтерактивний інтерфейс користувача для візуалізації мікрокліматичних параметрів. Система дозволяє відображати як поточні значення, так і їхню історичну динаміку як часові графіки, створені з використанням бібліотеки *Chart.js*.

Особливістю клієнтського рівня є реалізація механізму інформування про порушення допустимих меж параметрів. Зокрема, система сигналізує про:

– температуру нижче ніж 15 °C або вище за 28 °C;

– відносну вологість нижче ніж 40% або вище ніж 60%;

– перевищення рівня CO_2 понад 1 000 ppm.

Користувачі також мають змогу перемикатися між аудиторіями, оперативно отримувати актуальні дані про мікроклімат у конкретному приміщенні.

Прототип аналітичної панелі

Представлений концепт інтерфейсу вебресурсу розроблено з метою забезпечення ефективного моніторингу стану навчальних аудиторій і відповідних параметрів мікроклімату, зокрема температури, вологості повітря та концентрації діоксиду вуглецю (CO_2). Окрім того, система відображає стан підключення сенсорних пристроїв і сигналізує про наявність критичних відхилень, які можуть негативно впливати на комфорт та безпеку перебування у приміщеннях. Запропонований інтерфейс орієнтований на використання адміністративним і технічним

https://doi.org/10.32782/mathematical-modelling/2025-8-1-24

персоналом закладів освіти, а також може бути корисним для фахівців з охорони праці, інших відповідальних осіб, задіяних у процесах забезпечення належного мікроклімату. Завдяки візуалізації даних у режимі реального часу й інтерактивній структурі система дозволяє своєчасно реагувати на потенційні загрози, оптимізувати використання ресурсів і підвищувати загальний рівень комфорту й безпеки в навчальному середовищі.

Інтерфейс сторінки «Головна» реалізовано як інтерактивну аналітичну панель, яка відображає узагальнену інформацію про мікрокліматичні показники в закладі. Сторінка складається з кількох логічних блоків.

Блок середніх показників. У верхній частині сторінки відображаються агреговані значення температури, вологості та якості повітря (рис. 2). Кожен із параметрів подано не лише як числове значення, але й у формі графіка змін протягом дня, що дозволяє виявляти тренди та потенційні аномалії.

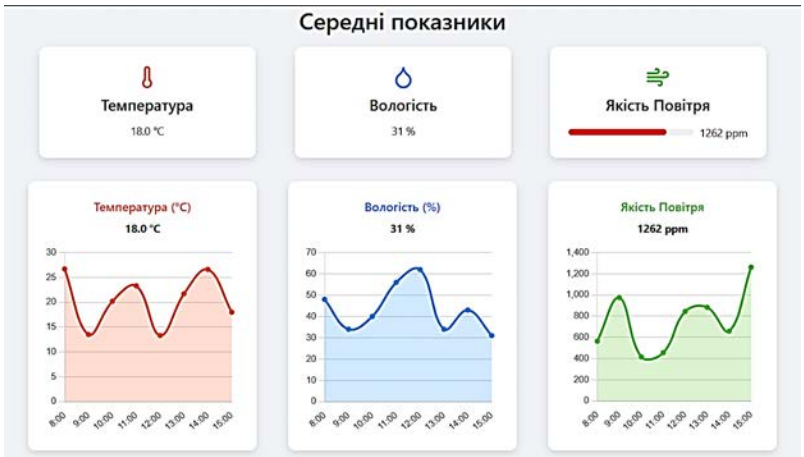

Рис. 2. Сторінка «Головна»: блок – середні показники навчальних аудиторій

Наступний функціональний блок ідентифікує аудиторії, у яких зафіксовано відхилення від нормативних показників (рис. 3). Система автоматично визначає характер проблеми (наприклад, перевищення рівня вологості або підвищений вміст CO_2) і маркує відповідне приміщення для подальшого реагування.

Рис. 3. Сторінка «Головна»: блок – аудиторії, які потребують уваги

https://doi.org/10.32782/mathematical-modelling/2025-8-1-24

Останній блок призначено для діагностики працездатності системи збору даних (рис. 4). Він містить перелік датчиків, що втратили зв'язок із системою, із зазначенням останніх переданих показників, можливої причини відключення та тривалості періоду, протягом якого пристрій не передає дані.

Аудиторія	Причина відключення	Останні передані показники			Час	Кількість часу після відключення
		Температура	Вологість	Якість повітря		
5	Battery Low	16.9°C	43%	1436 ppm	12:11	3 год 40 хв
6	Maintenance Required	31.6°C	40%	699 ppm	08:08	7 год 43 хв
7	Signal Lost	19.0°C	60%	619 ppm	07:37	8 год 14 хв
8	Maintenance Required	19.0°C	49%	1030 ppm	15:05	0 год 46 хв

Рис. 4. Сторінка «Головна»: блок – пристрої, які потребують уваги

Інтерфейс сторінки «Навчальні» розроблено для візуального моніторингу мікрокліматичних умов у навчальних приміщеннях (рис. 5). Система надає користувачам можливість безперервно відстежувати ключові параметри середовища, зокрема температуру повітря, відносну вологість і рівень забруднення повітря (вимірюваний у ppm, наприклад, концентрацію CO_2). Користувач може вибрати конкретну аудиторію для перегляду детальної інформації про її поточний стан і динаміку зміни параметрів упродовж дня.

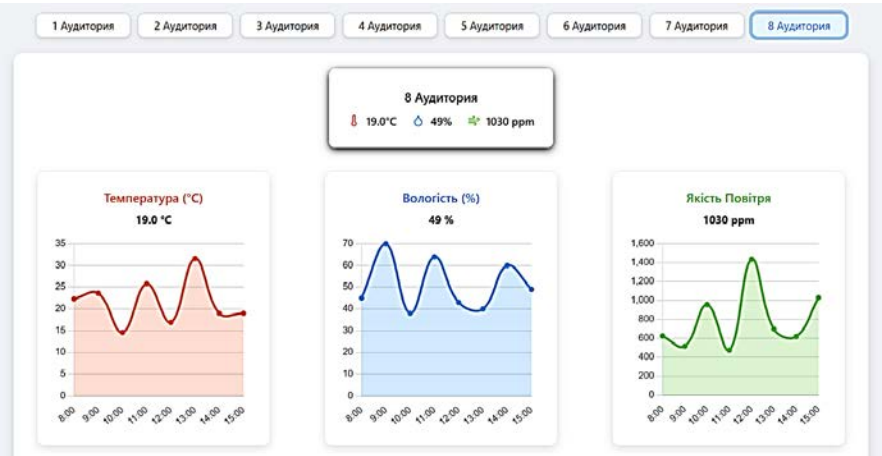

Рис. 5. Сторінка «Навчальні аудиторії» для перегляду показників аудиторій

Інтерфейс сторінки "IoT" призначено для візуального відстеження стану підключених пристроїв і аналізу їхньої роботи в режимі реального часу. Він відображає статус кожного мікроконтролера, зокрема й підключення до мережі, останні зафіксовані показники (температуру, вологість, якість повітря) та час останньої синхронізації даних (рис. 6). Такий підхід дає змогу технічному персоналу оперативно виявляти аномалії у функціонуванні системи, зокрема втрату зв'язку, потребу в обслуговуванні або відхилення параметрів від нормативних значень. Інтерфейс забезпечує зручний інструмент для комплексного моніторингу стану IoT-інфраструктури, що полегшує діагностику проблем і прискорює їх усунення. Окрім того, система накопичує історичні дані, що дає змогу аналізувати довгострокові тенденції та вдосконалювати роботу моніторингової системи.

https://doi.org/10.32782/mathematical-modelling/2025-8-1-24

Аудиторія	Стан	Температура	Вологість	Якість повітря	Час останньої передачі даних
5	Battery Low	16.9°C	43%	1436 ppm	17 квітня 2025 р.
6	Maintenance Required	31.6°C	40%	699 ppm	17 квітня 2025 р.
7	Signal Lost	19.0°C	60%	619 ppm	17 квітня 2025 р.
8	Maintenance Required	19.0°C	49%	1030 ppm	17 квітня 2025 р.
1	OK	22.3°C	45%	626 ppm	17 квітня 2025 р.
2	OK	23.6°C	70%	518 ppm	17 квітня 2025 р.
3	OK	14.6°C	38%	958 ppm	17 квітня 2025 р.
4	OK	25.8°C	64%	475 ppm	17 квітня 2025 р.

Рис. 6. Сторінка “IoT” для перегляду статусу всіх пристроїв

Система моніторингу мікроклімату демонструє низку ключових переваг порівняно з комерційними IoT-рішеннями, особливо в контексті використання в освітніх установах:

1. Вартість і доступність. Використання недорогих мікроконтролерів ESP32 та доступних сенсорів (DHT22, MQ-135) суттєво знижує загальну вартість упровадження системи, що робить її придатною для широкомасштабного застосування навіть у закладах з обмеженим бюджетом.

2. Відкритість і гнучкість. Архітектура базується на відкритих протоколах (HTTP/HTTPS, JSON) і програмних платформах (Django, PostgreSQL), що забезпечує легку інтеграцію з іншими системами, можливість розширення функціональності й адаптацію до специфічних потреб навчального середовища.

3. Локальна обробка даних і низькі затримки. Відмова від зовнішніх хмарних сервісів і обробка даних на власному сервері дозволяють мінімізувати затримки у виявленні критичних відхилень і забезпечити оперативне реагування, що особливо важливо для підтримання стабільного мікроклімату.

4. Підвищена конфіденційність і безпека. Усі дані передаються в зашифрованому вигляді (через HTTPS) і зберігаються локально, що знижує ризики, пов’язані з передачею конфіденційної інформації на сторонні сервери. Використання токен-автентифікації (X-shared-token) додатково захищає доступ до API.

5. Масштабованість. Система легко масштабується як на рівні пристроїв, так і в межах мережевої інфраструктури. Додавання нових сенсорних вузлів не потребує змін у загальній архітектурі, що дає змогу охоплювати більшу кількість аудиторій або цілих будівель без ускладнень.

6. Освітній потенціал. DIY-природа системи створює додаткову навчальну цінність: її можна використовувати як платформу для проведення практичних занять із програмування, схемотехніки, аналізу даних і кібербезпеки. Отже, система виконує як прикладну, так і навчально-методичну функцію.

Висновки

Розроблена IoT-система моніторингу умов у навчальних приміщеннях відповідає актуальним потребам закладів освіти в доступному, безпечному та гнучкому інструменті для контролю мікроклімату. Використання відкритої апаратно-програмної платформи ESP32 у поєднанні з локальним сервером дозволило реалізувати автономну систему збору, обробки та візуалізації екологічних даних у реальному часі без залежності від зовнішніх хмарних сервісів. Такий підхід забезпечує зменшення затримок в обробці, підвищення конфіденційності даних і незалежність від сторонніх інфраструктур, що є особливо важливим в умовах сучасних вимог до цифрової безпеки.

https://doi.org/10.32782/mathematical-modelling/2025-8-1-24

На відміну від більшості комерційних IoT-рішень, запропонований прототип підтримує гнучке підключення сенсорів різного типу (температури, вологості, CO_2), адаптацію до просторової специфіки приміщень і повний локальний контроль на всіх етапах обробки інформації. Це дозволяє точніше враховувати локальні умови навчального середовища й оперативно реагувати на відхилення від нормативних показників мікроклімату. З огляду на обмежені фінансові ресурси більшості освітніх установ, технічна простота й економічна ефективність запропонованої системи роблять її привабливою для широкого впровадження.

Система має модульну архітектуру, яка спрощує процес масштабування, оновлення функціональних можливостей і адаптацію до чинних нормативних вимог (зокрема, ISO 7730 та ДБН В.2.5-67:2013). Такий підхід дозволяє з мінімальними витратами інтегрувати нові сенсори або розширювати функціональність відповідно до змін у навчальному процесі чи регуляторному середовищі. Інтерфейс користувача орієнтований на зручне представлення ключових показників у зрозумілому вигляді, що підвищує ефективність моніторингу та сприяє ухваленню обґрунтованих управлінських рішень.

Отримані результати підтверджують доцільність застосування DIY-підходу до моніторингу мікроклімату як ефективної альтернативи дорогим пропрієтарним рішенням. Запропонована система є не лише технічно надійною і економічно доцільною, але й універсальною – вона може бути адаптована до офісних, лабораторних або інших громадських просторів. В умовах зростання значення сталого розвитку й енергоефективності в освітньому секторі такі рішення відкривають нові перспективи для подальших досліджень і практичного впровадження в інтелектуальну інфраструктуру сучасних навчальних закладів.

Список використаної літератури

1. Terzieva V., Ilchev S., Todorova K. The role of Internet of Things in smart education. *IFAC-PapersOnLine*. 2022. Vol. 55 (11). P. 108–113.
2. Hercog D., Lerher T., Truntič M., Težak O. Design and implementation of ESP32-based IoT devices. *Sensors*. 2023. Vol. 23 (15). Art. 6739.
3. Hamdan S., Ayyash M., Almajali S. Edge-Computing Architectures for Internet of Things Applications: A Survey. *Sensors*. 2020. Vol. 20 (22). Art. 6441.
4. International Organization for Standardization. ISO 7730:2005 – Ergonomics of the thermal environment. 2005.
5. Wargocki P., Wyon D.P. The relationships between classroom air quality and children's performance in school. *Building and Environment*. 2020. Vol. 173. Art. 106749.
6. Dai Z., Zhang Q., Zhao L., Zhu X., Zhou D. Cloud-Edge Computing Technology-Based Internet of Things System for Smart Classroom Environment. *International Journal of Emerging Technologies in Learning*. 2023. Vol. 18 (8). P. 79–96.
7. Singh N., Buyya R., Kim H. Securing Cloud-Based Internet of Things: Challenges and Mitigations. *Sensors*. 2025. Vol. 25 (1). Art. 79.
8. Fernandes E., Jung J., Prakash A. Security analysis of emerging smart home applications. *2016 IEEE Symposium on Security and Privacy*. 2016. P. 636–654.
9. Kitkowska A., Brodén K., Abdullah L. The requirements, benefits, and barriers of IoT solutions to support well-being in elementary schools. *IEEE Access*. 2024. Vol. 12. P. 144965–144981.

References

1. Terzieva, V., Ilchev, S., & Todorova, K. (2022). The role of Internet of Things in smart education. *IFAC-PapersOnLine*, 55 (11), 108–113 [in English].
2. Hercog, D., Lerher, T., Truntič, M., & Težak, O. (2023). Design and implementation of ESP32-based IoT devices. *Sensors,* 23 (15), Art. 6739 [in English].
3. Hamdan, S., Ayyash, M., & Almajali, S. (2020). Edge-Computing Architectures for Internet of Things Applications: A Survey. *Sensors,* 20 (22), Art. 6441 [in English].

https://doi.org/10.32782/mathematical-modelling/2025-8-1-24

4. International Organization for Standardization. (2005). ISO 7730:2005 – Ergonomics of the thermal environment [in English].
5. Wargocki, P., & Wyon, D.P. (2020). The relationships between classroom air quality and children's performance in school. *Building and Environment,* 173, Art. 106749 [in English].
6. Dai, Z., Zhang, Q., Zhao, L., Zhu, X., & Zhou, D. (2023). Cloud-Edge Computing Technology-Based Internet of Things System for Smart Classroom Environment. *International Journal of Emerging Technologies in Learning (iJET),* 18 (08), 79–96 [in English].
7. Singh, N., Buyya, R., & Kim, H. (2025). Securing Cloud-Based Internet of Things: Challenges and Mitigations. *Sensors,* 25 (1), Art. 79 [in English].
8. Fernandes, E., Jung, J., & Prakash, A. (2016). Security analysis of emerging smart home applications. *In: 2016 IEEE Symposium on Security and Privacy,* 636–654 [in English].
9. Kitkowska, A., Brodén, K., & Abdullah, L. (2024). The requirements, benefits, and barriers of IoT solutions to support well-being in elementary schools. *IEEE Access,* 12, 144965–144981 [in English].

Хоменко Євгеній Вікторович – аспірант кафедри комп'ютерних наук та програмної інженерії Херсонського державного університету. E-mail: yekhomenko@ksu.ks.ua, ORCID: 0000-0002-5972-7410.

Бабічев Сергій Анатолійович – доктор технічних наук, професор, професор кафедри інформатики університету Яна Євангеліста Пуркінє, Усті-над-Лабем, Чехія; професор кафедри фізики Херсонського державного університету. E-mail: sergii.babichev@ujep.cz, sbabichev@ksu.ks.ua, ORCID: 0000-0001-6797-1467.

Khomenko Yevhenii Viktorovych – Postgraduate Student at the Department of Computer Science and Software Engineering of the Kherson State University. E-mail: yekhomenko@ksu.ks.ua, ORCID: 0000-0002-5972-7410.

Babichev Sergii Anatoliiovych – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor at the Department of Informatics of the Jan Evangelista Purkyně University in Ústí nad Labem, Czech Republic; Professor at the Department of Physics of the Kherson State University. E-mail: sergii.babichev@ujep.cz, sbabichev@ksu.ks.ua, ORCID: 0000-0001-6797-1467.

https://doi.org/10.32782/mathematical-modelling/2025-8-1-24