

УДК (UDC) 004.77:620.9

**Стецюренко Ілля
Станіславович**

магістрант кафедри системного проектування і спеціалізованих комп'ютерних систем факультету прикладної математики, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» Україна, 03056, м. Київ, пр. Берестейський, 37
e-mail: stetsiurenko.illia@ill.kpi.ua;
<https://orcid.org/0009-0009-8453-2154>

**Петрашенко Андрій
Васильович**

кандидат технічних наук, доцент кафедри системного проектування і спеціалізованих комп'ютерних систем факультету прикладної математики, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» Україна, 03056, м. Київ, пр. Берестейський, 37
e-mail: petrashenko@gmail.com;
<https://orcid.org/0000-0003-0239-1706>

Спосіб оптимізації енергоживлення IoT-системи моніторингу кліматичних показників на основі адаптивних алгоритмів

Актуальність. Стрімке зростання кількості пристроїв Інтернету речей (IoT), яке за прогнозами сягне 29 мільярдів до 2030 року, ставить перед розробниками нові виклики. Значна частина таких пристроїв — це автономні сенсорні вузли, що використовуються в агросекторі, екології та інфраструктурі «розумних міст». Розміщення у важкодоступних місцях робить їх залежними від автономних джерел живлення. Проблема полягає в тому, що традиційні алгоритми роботи, які базуються на фіксованих інтервалах передачі даних, є енергетично неефективними: вони витрачають ресурс батареї на передачу надлишкових даних у стабільних умовах або не забезпечують достатньої дискретизації при різких змінах параметрів середовища.

Мета. Розробка способу оптимізації енергоживлення IoT-системи моніторингу кліматичних показників на основі адаптивних алгоритмів та проведення порівняльного аналізу енергоефективності різних комунікаційних архітектур (Wi-Fi, BLE, LoRaWAN) для виявлення оптимальних рішень.

Методи дослідження. Для досягнення мети використано експериментально-аналітичний підхід. В якості апаратної платформи обрано мікроконтролер ESP32 (модуль ESP-WROOM-32), який поєднує високу продуктивність, наявність бездротових інтерфейсів та розвинені режими енергозбереження (Deep Sleep, ULP). Збір кліматичних даних здійснюється сенсором Bosch BME680. Хмарна інфраструктура реалізована на базі Amazon Web Services (AWS) з використанням безсерверної архітектури (AWS Lambda, DynamoDB, Redis). Для оцінки енергоефективності розроблено чотири еволюційні версії програмного забезпечення: від базової (активний режим) до адаптивних (локальна та хмарна адаптація). Ключовою метрикою ефективності обрано середній струм споживання за повний робочий цикл.

Результати. Розроблено гібридну модель керування енергоспоживанням, реалізовану у двох парадигмах: локальна адаптація (на пристрої) та хмарна адаптація (на сервері). Проведено серію натурних вимірювань для протоколів HTTP, MQTT, CoAP, BLE та LoRaWAN. Встановлено, що перехід на протокол CoAP з адаптивним алгоритмом у мережі Wi-Fi дозволяє знизити середнє споживання струму з 60.46 мА (базовий режим) до 12.47 мА (економія ~79%). Для архітектури LoRaWAN досягнуто зниження з 96.78 мА до 12.63 мА (економія 87%). Виявлено неефективність хмарної адаптації для протоколу MQTT через затримки зв'язку.

Висновки. Інтеграція адаптивних алгоритмів, що динамічно керують тривалістю фази сну, дозволяє знизити енергоспоживання на 70-87% порівняно з базовими режимами. Для систем з інфраструктурою Wi-Fi найбільш енергоефективним є протокол CoAP. Для задач, що вимагають максимальної автономності та радіусу дії, оптимальним вибором є LoRaWAN з локальним адаптивним алгоритмом.

Ключові слова: Інтернет речей, енергоефективність, адаптивні алгоритми, ESP32, Deep Sleep, MQTT, CoAP, LoRaWAN, BLE.

Як цитувати: Стецюренко І. С., Петрашенко А. В. Спосіб оптимізації енергоживлення IoT-системи моніторингу кліматичних показників на основі адаптивних алгоритмів. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, серія Математичне моделювання. Інформаційні технології. Автоматизовані системи управління*. 2025. вип. 68. С.70-76. <https://doi.org/10.26565/2304-6201-2025-68-07>

How to quote: Stetsiurenko, I. S., & Petrashenko, A. V. "Method of Power Supply Optimization for IoT Climate Monitoring System Based on Adaptive Algorithms", *Bulletin of V. N. Karazin Kharkiv National University, series Mathematical modelling. Information technology. Automated control systems*, vol. 68, pp. 70-76, 2025. <https://doi.org/10.26565/2304-6201-2025-68-07> [in Ukrainian]

1. Вступ

Інтернет речей (IoT) трансформувався з концептуальної парадигми в глобальну технологічну реальність. За прогнозами, кількість підключених пристроїв продовжить експоненційне зростання, охоплюючи критично важливі сфери: від точного землеробства до моніторингу кліматичних змін та управління міською інфраструктурою. Специфіка цих застосувань часто вимагає розгортання сенсорних вузлів у віддалених локаціях, де єдиним джерелом енергії є акумуляторні батареї. У таких умовах енергоефективність стає ключовим фактором, що визначає вартість володіння (TCO) та надійність системи. Традиційний підхід до передачі даних за фіксованим розкладом (static scheduling) демонструє свою неефективність: значна частина енергії витрачається на передачу надлишкових даних у періоди стабільності параметрів, тоді як фіксований інтервал може бути недостатнім для фіксації швидких динамічних змін [1].

2. Аналіз останніх досліджень і публікацій

Проблема оптимізації енергоспоживання в IoT є предметом багатьох сучасних досліджень. Значна увага приділяється апаратним методам, зокрема використанню режимів глибокого сну (Deep Sleep) у сучасних мікроконтролерах, таких як ESP32 [2]. Інший напрямок досліджень фокусується на виборі ефективних протоколів передачі даних. У роботах [3, 4] проведено порівняльний аналіз протоколів прикладного рівня (MQTT, CoAP, HTTP) і показано переваги CoAP для обмежених мереж. Також активно досліджуються технології LPWAN, зокрема LoRaWAN, як рішення для далекого зв'язку з низьким споживанням [5,6]. Проте в існуючій літературі бракує комплексних досліджень, які б поєднували апаратну оптимізацію, вибір протоколу та адаптивні алгоритми керування в рамках єдиної системи, а також надавали пряме експериментальне порівняння різних архітектур (Wi-Fi, BLE, LoRaWAN) для виконання ідентичної задачі моніторингу.

3. Постановка задачі

У даній роботі вирішується задача підвищення енергоефективності IoT-системи моніторингу кліматичних показників. Необхідно розробити метод адаптивного керування режимами роботи пристрою та експериментально визначити найбільш ефективну архітектуру зв'язку, що забезпечить баланс між актуальністю даних та часом автономної роботи.

4. Виклад основного матеріалу

4.1. Архітектура та апаратне забезпечення системи

Для реалізації енергоефективної системи моніторингу було застосовано експериментально-аналітичний підхід. В якості центрального обчислювального вузла обрано мікроконтролер ESP32 (модуль ESP-WROOM-32) [2]. Вибір цієї платформи зумовлений наявністю унікального для даного класу пристроїв ULP-співпроцесора (Ultra Low Power coprocessor). Це дозволяє реалізувати дворівневу архітектуру обробки даних:

- Основні ядра (Xtensa LX6): Виконують ресурсоємні задачі, такі як підключення до Wi-Fi, SSL/TLS шифрування та формування JSON-пакетів. Споживання струму в активному режимі сягає 190–240 мА.

- ULP-співпроцесор: Здатний періодично опитувати сенсори та виконувати прості логічні операції, поки основні ядра знаходяться в режимі глибокого сну (Deep Sleep). Споживання при цьому знижується до рівня ~150 мкА. У розробленій системі ULP використовується для моніторингу критичних відхилень параметрів, що дозволяє не будити основний процесор, якщо показники знаходяться в межах норми.

Для збору кліматичних даних (температура, вологість, тиск, якість повітря) використано інтегрований сенсор Bosch BME680 [7]. Критичним аспектом енергоспоживання цього сенсора є вимірювання летких органічних сполук (VOC), яке вимагає нагрівання чутливої пластини до 320°C. Це створює пікове навантаження на рівні 12–18 мА. Для оптимізації в алгоритмі передбачено адаптивне керування профілем нагріву: у режимах економії енергії вимірювання VOC виконується з меншою частотою, ніж вимірювання базових параметрів (Т/В/Р), що суттєво знижує середній струм споживання.

Для дослідження архітектури глобальних мереж (LPWAN) стенд оснащено трансивером Semtech SX1276 [6], який підключається через інтерфейс SPI. Це дозволяє реалізувати та порівняти роботу пристрою в мережі LoRaWAN.

4.2. Архітектура та апаратне забезпечення системи

В основу програмної реалізації покладено модель скінченного автомата (Finite State Machine — FSM). Система може перебувати в одному з чотирьох дискретних станів:

1. STATE_SLEEP: Мікроконтролер перебуває в режимі Deep Sleep. Активними залишаються лише RTC-таймер та енергонезалежна пам'ять RTC. Струм споживання мінімальний ($I_{\text{снү}} \approx 10 \dots 20 \text{ мА}$).
2. STATE_WAKEUP: Пробудження, ініціалізація шини I2C, зчитування даних із сенсора BME680.
3. STATE_ANALYZE: Локальний аналіз даних. Система порівнює поточні значення V_{cur} із попередніми V_{prev} , збереженими в пам'яті RTC. Розраховується абсолютна дельта змін $\Delta = [V_{\text{cur}} - V_{\text{prev}}]$
4. STATE_TRANSMIT: Активація радіомодуля (Wi-Fi/BLE/LoRa), встановлення з'єднання, передача даних, отримання підтвердження або команди.

Ключовим елементом розробленого методу є алгоритм адаптації інтервалу сну ($T_{\text{снү}}$). На відміну від статичного підходу, де $T_{\text{снү}} = \text{const}$, у запропонованому методі тривалість сну є функцією від стабільності середовища. Логіка адаптації описується наступним чином:

Якщо $\Delta < \delta_{\text{thr}}$ (де δ_{thr} - порогове значення стабільності), система переходить у режим енергозбереження, експоненційно збільшуючи інтервал сну для наступного циклу:

$$T_{\text{снү}}^{\text{new}} = \min(T_{\text{снү}}^{\text{old}} * k_{\text{inc}}, T_{\text{max}}) \quad (1)$$

де k_{inc} — коефіцієнт збільшення (наприклад, 1.5 або 2.0), а T_{max} — максимально допустимий інтервал між передачами (heartbeat).

Якщо $\Delta \geq \delta_{\text{thr}}$, система фіксує подію зміни стану, передає дані та скидає інтервал до мінімального значення для детального моніторингу динаміки процесу:

$$T_{\text{снү}}^{\text{new}} = T_{\text{min}} \quad (2)$$

Такий підхід дозволяє уникнути передачі надлишкових даних (data redundancy), коли параметри середовища не змінюються, зберігаючи при цьому високу частоту дискретизації при виникненні аномалій. Алгоритм реалізовано у двох парадигмах: локальна адаптація (рішення приймає мікроконтролер) та хмарна адаптація (рішення приймає сервер AWS Lambda на основі історичних трендів).

4.3. Аналіз особливостей реалізації комунікаційних стеків

Значний вплив на енергоефективність автономного пристрою мають накладні витрати (overhead) протоколів передачі даних. У роботі досліджено три основні підходи для IP-мереж (Wi-Fi):

- HTTP (REST): Характеризується найбільшими накладними витратами. Кожна транзакція вимагає встановлення нового TCP-з'єднання (3-way handshake), встановлення TLS-сесії (обмін сертифікатами) та передачі текстових заголовків. Це призводить до значного часу перебування в активному режимі ($T_{\text{акт}} > 4 \text{ с}$) навіть для передачі кількох байт корисного навантаження.
- MQTT: Використовує постійне TCP-з'єднання. Однак, у режимі Deep Sleep радіомодуль вимикається, і з'єднання розривається. Тому при кожному пробудженні пристрій змушений проходити процедуру CONNECT заново, що нівелює переваги легкості протоколу [8]. Крім того, у режимі v4 (Cloud Adaptation) MQTT показав найгірші результати через свою асинхронну природу: пристрій змушений утримувати радіоканал відкритим, очікуючи на PUBLISH повідомлення від сервера з новим часом сну, що збільшує активний час до 7–10 секунд.
- CoAP (Constrained Application Protocol): Працює поверх протоколу UDP [9]. Відсутність важкого рукостискання TCP та компактний бінарний заголовок (4 байти) дозволяють мінімізувати час перебування в ефірі [10]. Для забезпечення надійності використовується механізм підтверджуваних повідомлень (Confirmable messages), а безпека реалізується через DTLS. Експерименти показали, що CoAP забезпечує найменший час активності ($T_{\text{акт}} \approx 1,4 \text{ с}$), що робить його оптимальним для Wi-Fi мереж.

4.4. Специфіка реалізації LoRaWAN

Для архітектури глобальної мережі використано стек LoRaWAN класу А. Пристрої цього класу є найбільш енергоефективними, оскільки вони ініціюють зв'язок самостійно (Uplink) і

відкривають короткі вікна прийому (RX1, RX2) лише після передачі. Це накладає обмеження на реалізацію хмарної адаптації (v4): сервер може надіслати команду зміни інтервалу сну лише у відповідь на повідомлення від пристрою. Якщо серверна інфраструктура не встигає сформулювати відповідь у межах жорстких таймінгів RX-вікон (1-2 секунди), команда буде відкладена до наступного сеансу зв'язку.

Експериментально встановлено, що для LoRaWAN оптимальним є використання локальної адаптації (v3). Це виключає необхідність очікування downlink-повідомлень, дозволяючи пристрою переходити в сон одразу після завершення передачі (TX Done).

4.5. Методика експериментального дослідження

Для верифікації запропонованих моделей розроблено чотири еволюційні версії програмного забезпечення:

v1 (Baseline): Базова версія без оптимізації. Пристрій постійно активний.

v2 (Deep Sleep): Циклічний сон з фіксованим інтервалом (наприклад, 30 с).

v3 (Local Adaptation): Адаптивний алгоритм з прийняттям рішень на пристрої.

v4 (Cloud Adaptation): Адаптивний алгоритм з прийняттям рішень у хмарі (AWS Lambda).

Ключовою метрикою ефективності обрано середній струм споживання ($I_{сер}$) за повний робочий цикл, який формулюю:

$$I_{сер} = \frac{I_{акт} * T_{акт} + I_{сну} * T_{сну}}{T_{акт} + T_{сну}} \quad (3)$$

де $I_{акт}$ та $T_{акт}$ - струм і тривалість активної фази, а $I_{сну}$ та $T_{сну}$ - струм і тривалість фази сну. Дана методика дозволяє об'єктивно порівняти ефективність різних архітектур незалежно від ємності джерела живлення.

5. Результати експерименту

В ході експериментального дослідження було проведено серію натурних вимірювань енергоспоживання для п'яти комунікаційних протоколів: HTTP, MQTT, CoAP (у мережі Wi-Fi), а також BLE та LoRaWAN. Для кожного протоколу (де це архітектурно можливо) було протестовано чотири режими роботи: від базового (v1) до хмарно-адаптивного (v4). Результати вимірювань усередненого струму споживання ($I_{сер}$) та тривалості активної фази $T_{акт}$ наведено в таблиці 1.

Протокол	Режим	Такт (с)	Iсер (мА)	Зниження відн. v1
HTTP	v1	4.33	59.61	0%
	v2	8.96	24.68	58.6%
	v3	8.78	17.17	71.2%
	v4	5.05	16.59	72.2%
MQTT	v1	7.39	63.43	0%
	v2	5.69	22.08	65.2%
	v3	5.62	16.11	74.6%
	v4	10.43	15.34	75.8%
CoAP	v1	2.63	60.46	0%
	v2	4.54	19.89	67.1%
	v3	4.46	12.61	79.2%
	v4	4.49	12.47	79.4%
BLE	v1	2.98	56.88	0%
	v2	6.93	22.43	60.6%
	v3	3.56	14.38	74.7%
LoRaWAN	v1	3.62	96.78	0%
	v2	3.32	19.20	80.2%
	v3	2.79	12.63	87.0%

Аналіз отриманих експериментальних даних дозволяє стверджувати, що впровадження режиму глибокого сну є найбільш вагомим фактором оптимізації, оскільки перехід від базового режиму постійної активності до режиму циклічного сну забезпечує зниження середнього енергоспоживання на 58–80% залежно від обраного протоколу. Найбільший відносний ефект спостерігається для архітектури LoRaWAN, де високе базове споживання трансивера в режимі очікування повністю нівелюється при переході системи в сон, що дозволяє досягти зниження середнього струму більш ніж на 80%. Подальше застосування розроблених адаптивних алгоритмів дозволило досягти додаткової економії енергоресурсів за рахунок динамічного збільшення інтервалів сну в періоди стабільності вимірюваних параметрів. Для протоколів сімейства IP це забезпечило зниження середнього струму до 12–17 мА, що становить сумарну економію до 79% відносно базового рівня. Важливо зазначити, що різниця в ефективності між локальною та хмарною моделями адаптації виявилася статистично незначною, що підтверджує гіпотезу про те, що ключовим фактором енергозбереження є саме адаптивне керування шпаруватістю передачі даних, а не локалізація обчислювальних процесів.

Порівняльний аналіз протоколів передачі даних у мережі Wi-Fi виявив суттєву перевагу протоколу CoAP, який продемонстрував найнижчий показник середнього струму споживання на рівні 12,47 мА. Це пояснюється використанням транспортного протоколу UDP, що дозволяє уникнути накладних витрат на встановлення з'єднання та процедури рукоштовкування, характерних для TCP, і тим самим мінімізувати час перебування радіомодуля в активному стані. У той же час протокол MQTT у режимі хмарної адаптації продемонстрував зниження ефективності через збільшення тривалості активної фази, що зумовлено необхідністю утримання з'єднання для очікування асинхронної команди від сервера. Результати дослідження альтернативних архітектур показали, що технологія LoRaWAN у режимі локальної адаптації забезпечує енергоефективність на рівні 12,63 мА, що є співставним з найкращими показниками Wi-Fi рішень, проте забезпечує значно більший радіус покриття. Технологія BLE також підтвердила свою ефективність для локальних сенсорних мереж із показником середнього струму 14,38 мА. Таким чином, експериментально доведено, що для систем з критичними вимогами до автономності та радіусу дії найбільш доцільним є використання технології LoRaWAN з локальним адаптивним алгоритмом, тоді як для інфраструктурних рішень з наявним покриттям Wi-Fi оптимальним вибором є протокол CoAP.

Висновки

У межах проведеного дослідження успішно розв'язано актуальне науково-прикладне завдання підвищення енергоефективності та автономності IoT-систем моніторингу кліматичних показників. Ключовим науковим здобутком роботи є розробка та обґрунтування комплексного гібридного методу керування енергоспоживанням. Запропонований підхід базується на синергетичному поєднанні апаратних можливостей сучасних мікроконтролерів (зокрема, режимів глибокого сну Deep Sleep та ULP-співпроцесора ESP32) із розробленими програмними адаптивними алгоритмами. В основу алгоритмізації покладено модель скінченного автомата (FSM), реалізовану у двох парадигмах — локальній (обробка на кінцевому пристрої) та хмарній (обробка на сервері), що дозволило створити гнучку систему, здатну динамічно адаптувати частоту дискретизації до змін параметрів навколишнього середовища, мінімізуючи час активності радіомодуля без втрати інформативності моніторингу.

Експериментальна верифікація запропонованого підходу, проведена на розробленому апаратно-програмному стенді, підтвердила його високу ефективність. Перехід від традиційних статичних алгоритмів з фіксованим розкладом до адаптивних стратегій забезпечив зниження середнього енергоспоживання системи на 70–87 % порівняно з базовими режимами постійної активності. Детальний порівняльний аналіз комунікаційних архітектур дозволив виявити наступні закономірності:

1. Для інфраструктурних рішень на базі мереж Wi-Fi найбільш енергоефективним є протокол CoAP (із середнім струмом споживання ~12,5 мА). Його перевага над MQTT та HTTP зумовлена використанням транспортного протоколу UDP, що мінімізує накладні витрати на встановлення з'єднання та рукоштовкування, скорочуючи час активності радіомодуля до 1,4–4,5 с.

2. Використання протоколу MQTT у режимі хмарної адаптації виявилось недоцільним для задач енергозбереження через значні затримки (понад 10 с) на очікування команд від сервера, що нівелює потенційну економію від оптимізації сну.
3. Для завдань, які вимагають максимальної автономності та покриття великих територій (агромоніторинг, екологія), безальтернативним лідером визначено архітектуру LoRaWAN у поєднанні з локальним адаптивним алгоритмом. Вона забезпечує високу енергоефективність (~12,6 мА) при рекордно низькому часі активності трансивера та відсутності необхідності у складній процедурі асоціації з мережею.

Практична значущість отриманих результатів полягає у формуванні обґрунтованих інженерних рекомендацій, які дозволяють розробникам обирати оптимальний комунікаційний стек ще на етапі проектування системи. Розроблене програмне забезпечення та архітектурні рішення характеризуються модульністю і готові до безпосереднього впровадження у реальних проектах, що дозволить суттєво знизити експлуатаційні витрати (OPEX) за рахунок збільшення інтервалів обслуговування елементів живлення.

Перспективи подальшого розвитку роботи вбачаються у двох напрямках. По-перше, це інтеграція методів TinyML (машинного навчання на периферійних пристроях) безпосередньо на мікроконтролері. Використання легковагових нейронних мережі для прогнозування динаміки змін кліматичних параметрів дозволить ще точніше керувати інтервалами сну, випереджаючи події, а не лише реагуючи на них. По-друге, перспективним є поєднання запропонованого методу з технологіями збору енергії з навколишнього середовища (Energy Harvesting), зокрема сонячної енергії, що в комплексі з алгоритмами ультранизького споживання дозволить створити клас повністю енергонезалежних

REFERENCES

1. H. M. Jawad et al., "Energy-Efficient Wireless Sensor Networks for Precision Agriculture: A Review," *Sensors*, vol. 17, no. 8, p. 1781, 2017. <https://www.mdpi.com/1424-8220/17/8/1781>
2. Espressif Systems, "ESP32 Series Datasheet," 2024. https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf
3. Y. Guamán, G. Ninahualpa, G. Salazar, and T. Guarda, "Comparative Performance Analysis between MQTT and CoAP Protocols for IoT with Raspberry PI 3 in IEEE 802.11 Environments," in *2020 15th Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI)*, Sevilla, Spain, 2020, pp. 1–6. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9140905>.
4. Cherif, M. Belkadi, and D. Sauveron, "Towards Hybrid Energy-Efficient Power Management in Wireless Sensor Networks," *Sensors*, vol. 22, no. 1, p. 301, 2022. <https://www.mdpi.com/1424-8220/22/1/301>
5. Haxhibeqiri et al., "A Survey of LoRaWAN for IoT: From Technology to Application," *Sensors*, vol. 18, no. 11, p. 3995, 2018. <https://www.mdpi.com/1424-8220/18/11/3995>
6. Semtech Corporation, "SX1276 Wireless & RF Transceiver," 2024. <https://www.semtech.com/products/wireless-rf/lora-connect/sx1276>
7. Bosch Sensortec, "BST-BME680-DS001: BME680 Low power gas, pressure, temperature & humidity sensor," 2023. <https://www.bosch-sensortec.com/media/boschsensortec/downloads/datasheets/bst-bme680-ds001.pdf>
8. Banks and R. Gupta, "MQTT Version 5.0. OASIS Standard," 2019. <https://docs.oasis-open.org/mqtt/mqtt/v5.0/mqtt-v5.0.html>
9. Z. Shelby, K. Hartke, and C. Bormann, "The Constrained Application Protocol (CoAP). RFC 7252," IETF, 2014. [Online]. Available: <https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc7252>
10. M. Martí, C. Garcia-Rubio, and C. Campo, "Performance Evaluation of CoAP and MQTT_SN in an IoT Environment," *Proceedings*, vol. 31, no. 1, p. 49, 2019. <https://www.mdpi.com/2504-3900/31/1/49>

Stetsiurenko Illia *Master student of the Department of System Design and Specialized Computer Systems, Faculty of Applied Mathematics, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" Ukraine, 03056, Kyiv, Beresteyskyi Ave., 37*
e-mail: stetsiurenko.illia@ill.kpi.ua;
<https://orcid.org/0009-0009-8453-2154>

Petrashenko Andrii *PhD, Associate Professor of the Department of System Design and Specialized Computer Systems, Faculty of Applied Mathematics, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" Ukraine, 03056, Kyiv, Beresteyskyi Ave., 37*
e-mail: petrashenko@gmail.com;
<https://orcid.org/0000-0003-0239-1706>

Method of power supply optimization for iot climate monitoring system based on adaptive algorithms

Relevance. The rapid growth of the Internet of Things (IoT) has led to the massive deployment of autonomous sensor nodes in remote locations, such as precision agriculture and environmental monitoring. These devices rely heavily on battery power, making energy efficiency a critical factor for system viability and maintenance costs. Traditional static data transmission schedules are inefficient, wasting energy during stable conditions or missing critical data during rapid environmental changes. Therefore, developing adaptive energy management strategies is highly relevant.

Goal. The study aims to develop a method for optimizing the power supply of an IoT climate monitoring system based on adaptive algorithms and to conduct a comparative analysis of the energy efficiency of different communication architectures (Wi-Fi, BLE, LoRaWAN) to identify optimal solutions for various operational scenarios.

Research methods. An experimental-analytical approach was used. The hardware platform was built on the ESP32 microcontroller and BME680 sensor. A finite state machine model was proposed to manage device states, implemented in two paradigms: local adaptation (decision-making on the device) and cloud adaptation (control via AWS Lambda). A series of field measurements were conducted for five communication protocols: HTTP, MQTT, CoAP (over Wi-Fi), BLE, and LoRaWAN, testing four evolutionary software versions from basic to fully adaptive.

Results. The experiments confirmed the effectiveness of the proposed approach. For Wi-Fi networks, switching to the CoAP protocol with an adaptive algorithm reduced the average current consumption from 60.46 mA (baseline) to 12.47 mA, achieving savings of about 79%. For the LoRaWAN architecture, a reduction from 96.78 mA to 12.63 mA (87% savings) was achieved. It was found that cloud-based adaptation is less effective for "heavy" protocols like MQTT due to latency.

Conclusions. The integration of adaptive algorithms that dynamically control the sleep interval allows for a reduction in energy consumption by 70-87% compared to baseline modes. For systems with Wi-Fi infrastructure, the CoAP protocol is the most energy-efficient. For tasks requiring maximum autonomy and range, LoRaWAN with a local adaptive algorithm is the optimal choice.

Keywords: *Internet of Things, energy efficiency, adaptive algorithms, ESP32, Deep Sleep, MQTT, CoAP, LoRaWAN, BLE.*