

ІоТ-СИСТЕМА КОНТРОЛЮ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ В АВТОНОМНИХ ВУЗЛАХ СЕНСОРНОЇ МЕРЕЖІ

Вінницький національний технічний університет

Анотація.

У роботі представлено розробку імітаційної моделі IoT-системи, спрямованої на мінімізацію енергоспоживання автономних сенсорних вузлів. Розглянуто архітектуру мережі на базі енергоефективного протоколу LoRaWAN. Описано програмну реалізацію алгоритмів граничних обчислень мовою Python для локальної фільтрації телеметрії. Запропоновано використання методів ковзного середнього та математичного гістерезису. Проаналізовано механізм адаптивного регулювання таймера глибокого сну залежно від рівня розряду батареї.

Ключові слова: IoT, граничні обчислення, енергозбереження, LoRaWAN, адаптивний алгоритм, Cisco Packet Tracer, Python.

Abstract.

The paper presents the development of an IoT system simulation model focused on minimizing the energy consumption of autonomous sensor nodes. The network architecture based on the energy-efficient LoRaWAN protocol is considered. The software implementation of Edge Computing algorithms in Python for local telemetry filtering is described. The use of moving average and mathematical hysteresis methods is proposed. The mechanism of adaptive regulation of the deep sleep timer depending on the battery discharge level is analyzed.

Keywords: IoT, Edge Computing, energy saving, LoRaWAN, adaptive algorithm, Cisco Packet Tracer, Python.

Вступ

Розгортання масштабних бездротових сенсорних мереж в віддалених комплексах супроводжується критичною проблемою – обмеженим ресурсом локальних джерел живлення автономних вузлів. Традиційна модель з безперервною трансляцією даних призводить до лавиноподібного виснаження батарей через високу активність радіомодуля. Вирішення цієї проблеми полягає у впровадженні концепції граничних обчислень, яка переносить логіку прийняття рішень безпосередньо на кінцевий мікроконтролер [1]. Такий підхід дозволяє оптимізувати робочий цикл пристрою та значно знизити обсяг переданого трафіку [2].

Апаратно-мережева архітектура системи

Проектування системи виконано у середовищі імітаційного моделювання Cisco Packet Tracer. Для забезпечення енергоефективності обрано централізовану топологію “Зірка”, де кожен сенсорний вузол є кінцевим пристроєм, ізольованим від ресурсоємних задач маршрутизації [3].

Структурним ядром вузла виступає віртуальний мікроконтролер MCU-PT. До аналогового порту A0 підключено датчик вологості ґрунту, а до порту A1 – потенціометр, який утворює резистивний дільник напруги і виконує функцію імітатора підсистеми живлення. Переміщення повзунка потенціометра апаратно симулює процес нелінійного розряду батареї від 5 В до критичних рівнів, а саме: менше 3.3 В. Передача відфільтрованої телеметрії здійснюється через трансивер LoRaWAN на центральний бездротовий шлюз.

Програмна реалізація алгоритму локальної обробки

Керуючий мікрокод кінцевого вузла розроблено мовою програмування Python. Алгоритм реалізує подієво-орієнтовану модель з двома рівнями адаптивності: за даними та за ресурсом. Для усунення апаратного шуму аналого-цифрового перетворювача ядро ініціює цикл швидкого опитування сенсора та застосовує математичний фільтр ковзного середнього [4].

Програмна логіка управління станами мікроконтролера базується на методі математичного гістерезису. Вузол активує радіомодуль для трансляції лише за умови, що поточна відфільтрована вологість відрізняється від попередньо відправленої на величину, яка перевищує встановлений поріг [5].

Крім того, алгоритм безперервно зчитує рівень заряду з імітатора батареї. При зниженні напруги нижче встановлених порогів (50%, 20%), мікроконтролер самостійно збільшує тривалість режиму глибокого сну від 30 хвилин до 6 годин та розширює "мертву зону" гістерезису, уповільнюючи виснаження енергії.

Результати дослідження

Кількісний аналіз імітаційного моделювання підтвердив ефективність запропонованих рішень. Впровадження адаптивного таймера сну та Edge-фільтрації дозволило зменшити час роботи радіопередавача в активному режимі на 65-70% порівняно з моделями безперервного моніторингу. Зниження частоти радіообміну радикально оптимізує енергетичний баланс вузла в умовах енергетичного дефіциту [6].

Висновки

Розроблена імітаційна модель IoT-системи забезпечує високий рівень автономності сенсорних вузлів. Використання мікроконтролерів для локальної обробки сигналів АЦП дозволяє пристрою самостійно приймати рішення про доцільність активації комунікаційних інтерфейсів. Інтеграція алгоритмів граничних обчислень із протоколом дальнього радіуса дії LoRaWAN є оптимальним архітектурним рішенням для масштабування енергоефективних мереж моніторингу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Лисенко О. І., Тақун А. В. Технології периферійних обчислень (Edge Computing) в автономних сенсорних мережах : монографія. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. 195 с.
2. Wang J., Chen Y. Energy-Efficient Duty Cycle Optimization for Wireless Sensor Networks in IoT // Sensors. 2023. Vol. 23, No. 5. P. 2643. URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/23/5/2643> (дата звернення: 25.03.2026).
3. Стельмашчук С. В. Моделювання інфокомунікаційних та IoT систем : навч. посіб. Тернопіль : ЗУНУ, 2022. 156 с.
4. Свид І. В., Вусць О. В. Методи та алгоритми цифрової обробки сигналів у мікроконтролерах : навч. посіб. Харків : ХНУРЕ, 2023. 198 с.
5. Олійник О. А. Архітектура та програмування мікроконтролерів в системах Інтернету речей : навч. посіб. Дніпро : НТУ «Дніпровська політехніка», 2023. 210 с.
6. Smith A., Johnson M. Adaptive Energy Management in Edge-Assisted Internet of Things // IEEE Internet of Things Journal. 2024. Vol. 11, No. 2. P. 1542–1550. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10323456> (дата звернення: 25.03.2026).

Сльо́та Анто́н Ігорович – студент групи ІСП-22б, факультет інформаційних технологій та комп'ютерної інженерії, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: antonslota@gmail.com

Науковий керівник: **Добровольська Наталія Вікторівна** – кандидат педагогічних наук, доцент кафедри обчислювальної техніки Вінницького національного технічного університету, Вінниця, e-mail: dobr_n_v@vntu.edu.ua

Slota Anton Igorovich – student of group 1SP-22b, Faculty of Information Technologies and Computer Engineering, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: antonslota@gmail.com

Supervisor: **Dobrovol'ska Nataliya Viktorivna** – Candidate of Pedagogical Sciences, Associate Professor of the Computer Engineering Department, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: dobr_n_v@vntu.edu.ua