

УДК 681.518

РОЗРОБКА ІoT-СИСТЕМИ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОГО МОНІТОРИНГУ УМОВ ЗБЕРІГАННЯ ПРОДУКЦІЇ НА БАЗІ МІКРОКОНТРОЛЕРА ESP32

Головей І.М., студент

Київський національний університет технологій та дизайну

Лебеденко Ю.О., кандидат технічних наук, доцент

Київський національний університет технологій та дизайну

Ключові слова: моніторинг, прогнозування, Інтернет речей, мікроконтролер, вбудована система, автоматизація.

Забезпечення якості продукції, що швидко псується, у ланцюгах постачання є одним із ключових завдань сучасної промислової автоматизації та логістики. За даними Продовольчої та сільськогосподарської організації ООН (FAO), близько третини всіх харчових продуктів у світі втрачається або псується, причому значна частина втрат відбувається саме через порушення температурно-вологісного режиму при зберіганні та транспортуванні [1].

Концепція «Інтернету речей» (Internet of Things, IoT) відкриває принципово нові можливості для переходу від пасивної фіксації відхилень до активного прогнозування та запобігання критичним ситуаціям у режимі реального часу.

Мета роботи – проектування та програмна реалізація вбудованої системи моніторингу мікроклімату складського приміщення з функцією прогнозування залишкового часу безпечного зберігання продукції на основі мікроконтролерної платформи ESP32.

Структурна схема IoT-системи інтелектуального моніторингу представлена на рисунку 1.

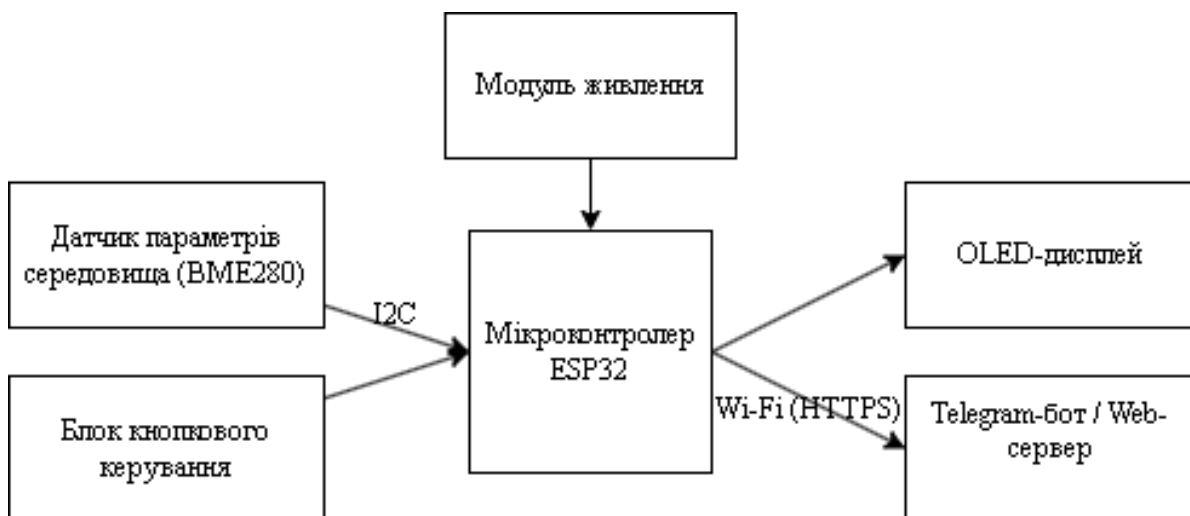


Рисунок 1 – Структурна схема IoT-системи інтелектуального моніторингу

Центральним обчислювальним вузлом системи є двоядерний 32-бітний мікроконтролер ESP32 (Xtensa LX6, 240 МГц) з вбудованим стеком протоколів Wi-Fi та Bluetooth [2].

Прецизійне вимірювання температури ($\pm 0,5$ °C), відносної вологості (± 3 %) та атмосферного тиску здійснює цифровий датчик Bosch BME280, підключений за інтерфейсом I2C [3]. Локальна візуалізація параметрів реалізована на OLED-дисплеї з роздільною здатністю 128×64 пікселів. Для керування режимами відображення передбачено чотири апаратних кнопки з обробкою переривань.

Алгоритм прогнозування SpoilTime. Ключовою науково-практичною складовою роботи є розроблений алгоритм SpoilTime, який на кожній ітерації основного циклу аналізує динаміку зміни температури на основі ковзного вікна з 20 останніх вимірювань. Швидкість зростання температури (тренд, °C/хв) визначається як різниця між поточним і попереднім значенням у вікні. У разі позитивного тренду система розраховує прогнозований час (у хвилинах) до досягнення критичної межі безпечного зберігання. Для підвищення достовірності результатів реалізована дворівнева валідація даних: при виявленні аномальних стрибків показників (завади на шині I2C) виконується повторне зчитування сенсора.

Логічна послідовність функціонування розробленого алгоритму представлена на рисунку 2.

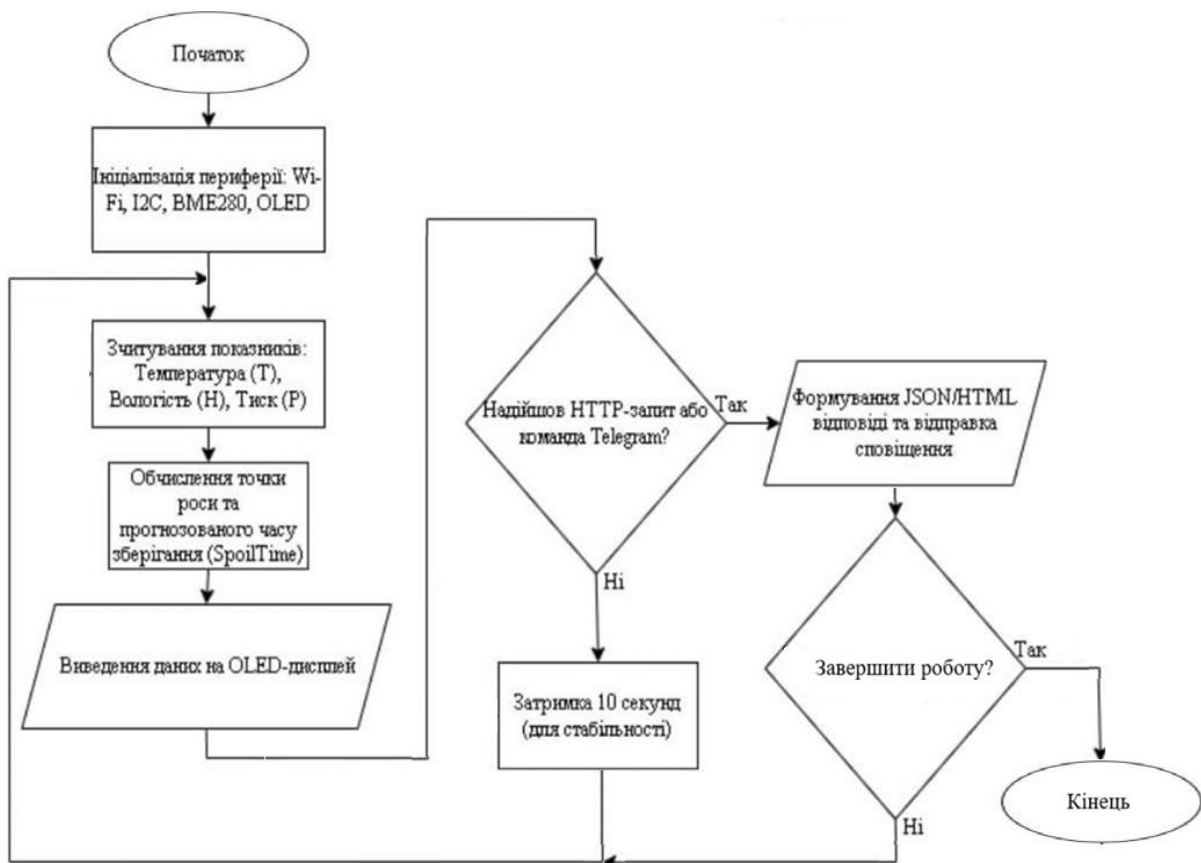


Рисунок 2 – Алгоритм функціонування вбудованої системи

Додатково система обчислює точку роси за формулою Магнуса [4], що дозволяє оцінити ризик конденсації вологи на поверхні продукції та обладнання – критичний параметр при зберіганні електроніки та деяких груп харчових продуктів.

Мережеві інтерфейси та дистанційне оповіщення. Для забезпечення дистанційного доступу до даних реалізовано два незалежні канали комунікації. Перший – вбудований HTTP-сервер на базі ESP32, що надає локальний веб-інтерфейс у форматі асинхронного обміну даними (AJAX/JSON) з відображенням добового графіка температурних коливань засобами Google Charts API [5]. Другий канал – інтеграція з Telegram Bot API [6], яка забезпечує надсилання Push-сповіщень у режимі реального часу при виході параметрів за граничні значення. Взаємодія із серверами Telegram відбувається через захищені HTTPS-запити.

Розроблена система реалізує повний цикл збору, обробки та передачі метеорологічних даних на платформі з обмеженими ресурсами. Практична цінність роботи полягає у можливості безпосереднього впровадження системи в реальних логістичних процесах – у холодильних складах, рефрижераторних транспортних засобах тощо. Модульна архітектура забезпечує масштабованість: підключення додаткових вузлів вимірювання потребує лише розширення програмного коду без зміни апаратної частини. Отримані результати можуть бути основою для подальших досліджень у напрямку адаптивного управління кліматичним обладнанням на основі прогностичних моделей.

Список використаних джерел

1. The State of Food and Agriculture 2019. Moving Forward on Food Loss and Waste Reduction / Food and Agriculture Organization of the United Nations. – Rome: FAO, 2019. – 182p. – URL: <https://www.fao.org/3/ca6030en/ca6030en.pdf> (дата звернення: 01.04.2026).
2. Kolban N. Kolban's Book on ESP32 / N. Kolban. – 2nd ed. – Leanpub, 2018. – 520 p. – URL: <https://leanpub.com/kolban-ESP32> (дата звернення: 01.04.2026).
3. BME280 Combined Humidity and Pressure Sensor. Datasheet / Bosch Sensortec. – 2021. – URL: <https://www.bosch-sensortec.com/media/boschsensortec/downloads/datasheets/bstbme280ds002.pdf> (дата звернення: 01.04.2026).
4. Lawrence M. G. The Relationship between Relative Humidity and the Dewpoint Temperature in Moist Air: A Simple Conversion and Applications / M. G. Lawrence // Bulletin of the American Meteorological Society. – 2005. – Vol. 86. – P. 225–233.
5. Google Charts. Visualization API Reference / Google LLC. – 2024. – URL: <https://developers.google.com/chart> (дата звернення: 01.04.2026).
6. Telegram Bot API. Documentation / Telegram Messenger Inc. – 2025. – URL: <https://core.telegram.org/bots/api> (дата звернення: 01.04.2026).