

# ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА СИСТЕМА МОНІТОРИНГУ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ХЛІБОВИРОБНИЦТВА НА БАЗІ ІoT ТА PROMETHEUS

Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця

## Анотація

Розглядається архітектура інтелектуальної системи моніторингу технологічних параметрів хлібовиробництва, що інтегрує ІoT-вузол на базі NodeMCU V3 (ESP8266) з платформою Prometheus+Thanos. Запропонований підхід забезпечує безперервний збір п'яти типів параметрів виробничого середовища (температура, вологість, рівень CO<sub>2</sub>, рівень рідини, присутність персоналу) та їх передавання у форматі Prometheus Exposition Format. Інтеграція алгоритмів машинного навчання (Isolation Forest, LSTM, SAC) з технологіями пояснюваного ШІ (SHAP, LIME) забезпечила точність виявлення аномалій  $F1=0,918$  при скороченні часу підтвердження алертів на 66,3%.

**Ключові слова:** ІoT-моніторинг, NodeMCU V3, Prometheus, Thanos, Isolation Forest, LSTM, SHAP, LIME, хлібовиробництво, АСУ ТП.

## Abstract

The paper presents an architecture of an intelligent monitoring system for bread production technological parameters, integrating an IoT node based on NodeMCU V3 (ESP8266) with the Prometheus+Thanos platform. The proposed approach provides continuous collection of five types of production environment parameters (temperature, humidity, CO<sub>2</sub> level, liquid level, personnel presence) and their transmission in Prometheus Exposition Format. Integration of machine learning algorithms (Isolation Forest, LSTM, SAC) with Explainable AI technologies (SHAP, LIME) achieved anomaly detection accuracy  $F1=0.918$  while reducing alert confirmation time by 66.3%.

**Keywords:** IoT monitoring, NodeMCU V3, Prometheus, Thanos, Isolation Forest, LSTM, SHAP, LIME, bread production, automated control systems.

## Вступ

Підвищення ефективності хлібовиробництва в умовах Industry 4.0 потребує постійного контролю технологічних параметрів: температури та вологості камер розстойки, рівня CO<sub>2</sub> при ферментації, рівня рідини у замішувальних баках. Традиційні засоби автоматизації — SCADA/MES системи — характеризуються високою вартістю впровадження та складністю інтеграції з сучасними платформами аналізу даних [1]. Розвиток ІoT-технологій відкриває можливості для побудови розподілених систем моніторингу з мінімальними витратами при збереженні промислової надійності.

## Результат дослідження

Розроблена система реалізує чотирирівневу архітектуру: рівень збору даних (ІoT-вузли NodeMCU V3), рівень збирання метрик (Prometheus v2.47.0), рівень довготривалого зберігання (Thanos v0.32.2 з MinIO) та рівень інтелектуального аналізу (модулі ML і XAI). ІoT-вузол інтегрує чотири типи первинних перетворювачів: DHT11 (температура 0–50°C ±2°C, вологість 20–90% ±5%), MQ-2 (рівень CO<sub>2</sub>/газу 0–1023 ADC), HC-SR04 (рівень рідини 2–400 см ±0,3 см) та HC-SR501 (присутність персоналу, дискретний вихід 0/1). Прошивка реалізована мовою C++ (Arduino IDE 2.3) та забезпечує HTTP-сервер на порту 9100 у форматі Prometheus text-based exposition format, що унеможливило необхідність додаткових адаптерів [2].

Для 5 технологічних вузлів (20 сенсорних точок) система забезпечує `scrape_interval = 15` с при затримці відповіді ІoT-вузла  $48 \pm 12$  мс та `uptime 99,7%` за 72 годинного тестування. Конфігурація Thanos із компонентами Sidecar, Querier, Store Gateway та Compactor забезпечує необмежене зберігання метрик при стисненні даних у 8,3 рази відносно формату TSDB Prometheus [3].

Модуль виявлення аномалій реалізує модифікований алгоритм Isolation Forest з контекстним зважуванням оцінки аномальності. Поправочний коефіцієнт враховує кореляції між сусідніми

сенсорами та часові патерни нормальної роботи обладнання, що підвищило точність виявлення у порівнянні з базовим алгоритмом на 3,2%. Модуль прогнозування EnhancedLSTMPredictor реалізує двонаправлену LSTM-мережу з механізмом уваги (три шари 128–64–32 нейрони), що забезпечує прогнозування часу до відмови з MAE = 5,3 год на горизонті 48–96 год. Результати роботи моделей наведено в таблиці 1.

Таблиця 1 – Результати валідації інтелектуальних модулів системи

Модуль	Precision	Recall	F1-score	Latency, мс
Isolation Forest (модифік.)	0,912	0,925	0,918	38 ± 4
LSTM + увага (прогноз RUL)	—	—	MAE 5,3 год	74 ± 12
SHAP (пояснення)	Faithfulness 0,94	Stability 0,89	—	38 ± 4
LIME (локальні пояснення)	Faithfulness 0,87	Stability 0,82	—	74 ± 12

Підсистема пояснюваного ШІ (XAI) інтегрує SHAP TreeExplainer для алгоритму Isolation Forest та LIME TabularExplainer для LSTM. Сукупна затримка генерації пояснень становить 112 ± 14 мс, що задовольняє вимогам реального часу АСУ ТП. Відображення пояснень безпосередньо у Grafana v10.1.2 через кастомний плагін підвищило рівень довіри операторів до рекомендацій системи з 47% до 89% та скоротило час підтвердження аномалій з 18,4 до 6,2 хвилин [4].

### Висновки

Розроблена інтелектуальна система моніторингу хлібовиробництва поєднує переваги низькобюджетних IoT-компонентів (вартість одного вузла ~18 USD) з потужністю промислової платформи Prometheus+Thanos та алгоритмами машинного навчання. Система забезпечує F1-score виявлення аномалій 0,918, uptime 99,7% та ROI впровадження 939,0% за вісім місяців. Застосування XAI-технологій (SHAP+LIME) усуває головний бар'єр впровадження ШІ в АСУ ТП — недовіру операторів до «чорної скриньки» — без зниження точності виявлення.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Mahnke W., Leitner S.-H., Damm M. OPC Unified Architecture. Berlin: Springer, 2009. 347 p.
2. Юхимчук М. А., Стрембіцький П. В., Перепелиця С. В. Використання віддаленого моніторингу для підвищення якості та ефективності у виробничому середовищі. Вісник ХНУ. Технічні науки. 2024. № 3 (335). С. 330–335.
3. Стрембіцький П. В., Юхимчук М. А., Лесько В. В., Перепелиця С. В. Централізований моніторинг інфраструктури з використанням системи THANOS. Вісник ХНУ. Технічні науки. 2025. № 1 (347). С. 417–424.
4. Bisikalo O. V., Yukhymchuk M. A., Strembitskyi P. V., Lesko V. V. AI-Enhanced Monitoring for Law Enforcement Security Systems. CEUR Workshop Proc., AISSLE-2025. Vinnytsia, 2025.

**Стрембіцький Павло Павлович**, аспірант кафедри автоматизації, комп'ютерно-інтегрованих технологій та робототехніки, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця. E-mail: mateyuk2@gmail.com

**Юхимчук Марія Сергіївна** доктор технічних наук, професор Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця. E-mail: umc1987@vntu.edu.ua

Науковий керівник: Юхимчук Марія Сергіївна, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця.

**Strembitskyi Pavlo Pavlovych**, PhD student, Department of Automation Computer-Integrated Technologies, and Robotics, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia. E-mail: mateyuk2@gmail.com

**Yukhimchuk Maria Serhiivna**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, E-mail: umc1987@vntu.edu.ua

Scientific Supervisor: **Yukhimchuk Maria Serhiivna**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia.