УДК 519.7:664.7

О. В. Мазурук[1]
В. Б. Мокін[1]

СЦЕНАРНО-ОРІЄНТОВАНА ГЕНЕРАЦІЯ ПОСЛІДОВНОСТЕЙ З БАГАТОСЕНСОРНИХ ДАНИХ ЗЕРНОВОГО ЕЛЕВАТОРА ТА ОЦІНЮВАННЯ ТОЧНОСТІ ЇХ ПРОГНОЗУВАННЯ РЕКУРЕНТНИМИ І ЗГОРТКОВИМИ НЕЙРОМЕРЕЖАМИ

[1] Вінницький національний технічний університет

Анотація

Запропоновано сценарно-орієнтований підхід до підготовки навчальних даних і формування послідовностей для прогнозування температурних процесів у зерносховищі за багатосенсорними IoT-вимірюваннями. На основі заданих часових інтервалів будуються сценарні вибірки, що відображають різні режими розвитку нагріву, після чого дані з кількох сенсорів об'єднуються в єдине представлення з маркуванням джерела, а потім – прогнозуються з використанням рекурентних і згорткових нейромереж.

Ключові слова: зерновий елеватор, зберігання зерна, штучний інтелект, нейромережі, автоматизоване управління, IoT-технології, моніторинг обладнання, технологічні процеси, системи управління даними.

Abstract

A scenario-oriented approach is proposed for training data preparation and sequence formation to predict temperature processes in a grain elevator based on multi-sensor IoT measurements. Based on predefined time intervals, scenario samples are constructed to reflect various heating development modes, after which data from multiple sensors are integrated into a single representation with source labeling and subsequently predicted using recurrent and convolutional neural networks.

Keywords: grain elevator, grain storage, artificial intelligence, neural networks, automated control, IoT technologies, equipment monitoring, technological processes, data management systems.

Вступ

Забезпечення кондиційної якості зернових мас та суворе дотримання регламентів зберігання є фундаментальними завданнями сучасної агропромисловості [1]. Неконтрольована термічна деградація в силосах, спричинена комплексом екзогенних та ендогенних факторів, призводить до псування продукції, позапланових зупинок технологічного обладнання та виникнення пожежонебезпечних ситуацій [2, 3]. У контексті експлуатації елеваторних комплексів виникає критична потреба у переході від констатації поточних параметрів до предиктивного моделювання динаміки температурних процесів. Це дозволяє реалізувати стратегію випереджального управління (вентилювання, переміщення зернових мас тощо) для мінімізації ризиків.

Традиційні методи моніторингу та прогнозування часто демонструють низьку адекватність у реальних виробничих умовах через високий рівень стохастичного шуму, неповні масиви даних та складну нелінійну динаміку теплообмінних процесів [4]. Додатковими дестабілізуючими факторами є варіативність просторового розміщення сенсорів, зміна рівня заповнення силосу та відсутність цілісних моделей інтерпретації взаємозв'язків між температурними зонами. Зазначені обставини обмежують ефективність спрощених апроксимаційних методів, зокрема лінійної інтерполяції.

Перспективним розв'язанням даної проблеми є застосування сценарно-орієнтованого підходу, що передбачає структурування даних відповідно до характерних режимів термічної динаміки. На основі

багатосенсорної телеметрії формуються спеціалізовані вибірки, які описують сценарії низької інтенсивності нагріву («оптимістичний»), стрімкої динаміки («песимістичний») та нормативного профілю. Такий підхід дозволяє трансформувати усереднену прогностичну модель у систему динамічної оцінки ризиків та оптимізувати етап попередньої обробки даних даних для навчання нейромережевих моделей.

Результати дослідження

Запропоноване дослідження виконано у межах подальшого розвитку науково-дослідної роботи № 2861 ВНТУ «Системний аналіз та прогнозування температури зерна у силосі зернового елеватора за даними IoT-системи з використанням технологій штучного інтелекту», де виконавцями були співавтори тез, на замовлення компанії ТОВ «ІННОВІННПРОМ». У межах поточної роботи було використано та переосмислено емпіричні дані, зібрані під час попереднього етапу дослідження.

У роботі реалізовано повний цикл підготовки даних і навчання моделей, що дозволяє відтворювано формувати вибірки під різні режими розвитку нагріву та коректно оцінювати якість прогнозу на тестових даних. На основі багатосенсорних вимірювань температури сформовано сценарні вибірки:

- MinDeep — сценарій повільного (умовно “оптимістичного”) розвитку нагріву;
- MaxDeep — сценарій швидкого (умовно “песимістичного”) розвитку нагріву.

Для підготовки даних у межах сценаріїв реалізовано такі етапи:

- відбір часових інтервалів для кожного сенсора/файлу та об’єднання вибраних фрагментів у єдиний датасет із маркуванням джерела (sensor);
- згладжування значень ковзним середнім (window=50) та нормалізація ознак методом Min–Max для змінних `VAL`, `OUT_T`, `UP_VAL`;
- генерація навчальних прикладів у вигляді послідовностей фіксованої довжини (sequence_length=10) та пакетування (batch_size=4);
- сенсорно-орієнтоване розбиття train/validation із часовим зрізом по кожному сенсору для зменшення ризику “витоку” інформації між сенсорами під час валідації.

У дослідженні побудовано й порівняно три типи моделей прогнозування:

- LSTM — рекурентна модель з двома LSTM-шарами та вихідним Dense-шаром;
- GRU — рекурентна модель з двома GRU-шарами та вихідним Dense-шаром;
- 1D-CNN — згорткова модель Conv1D + Flatten + Dense для виділення локальних патернів у часових рядах.

Моделі навчалися з ранньою зупинкою (EarlyStopping) та були протестовані на тестовій вибірці. У сценарії MinDeep отримано такі показники точності (RMSE, R^2):

- LSTM**:** RMSE = 0.0341, R^2 = 0.9870;
- GRU**:** RMSE = 0.01018, R^2 = 0.99884;
- 1D-CNN: RMSE = 0.004165, R^2 = 0.99981.

Візуальний аналіз результатів виконано шляхом побудови графіка «Actual vs Predicted Values» із накладанням прогнозів LSTM, GRU та 1D-CNN на тестові значення, що дозволило наочно порівняти узгодженість моделей із фактичними даними (рис. 1).

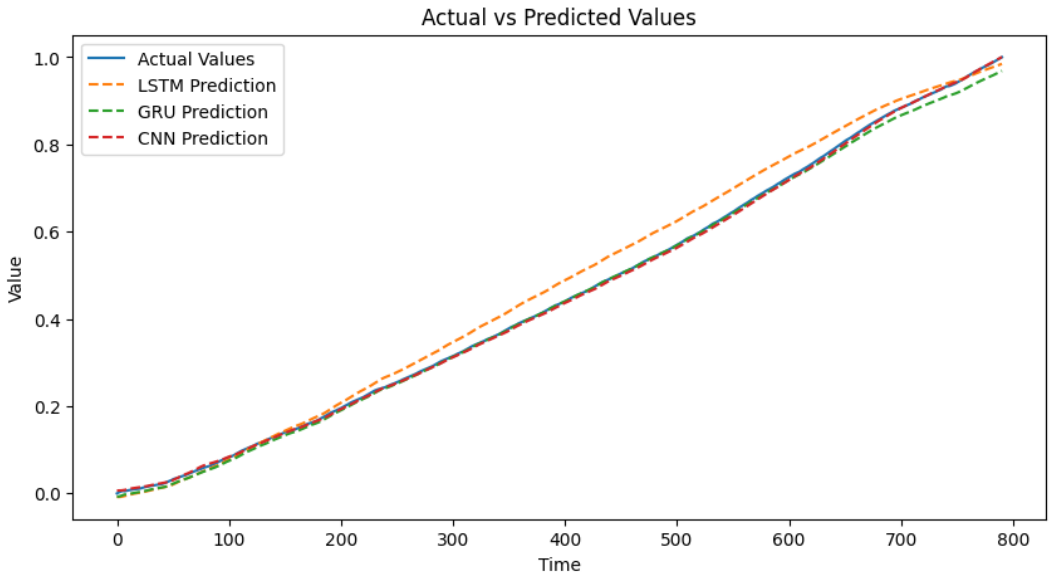

Рисунок 1 - Візуальний аналіз результатів

Висновки

Для підвищення якості даних застосовано згладжування ковзним середнім (window=50) та нормалізацію ознак методом Min–Max, що забезпечує стійкішу поведінку моделей за наявності шуму та різномасштабних параметрів. Запропоновано механізм генерації навчальних прикладів у вигляді послідовностей (sequence-to-one) та сенсорно-орієнтоване розбиття train/validation, яке зменшує ризик некоректної валідації через “змішування” даних між сенсорами.

Отримані результати мають прикладну цінність: програмна реалізація у вигляді Python-модуля є відтворюваною основою для інтеграції в діючі IoT-системи моніторингу та підтримки рішень, спрямованих на підвищення надійності, безпеки й енергоефективності експлуатації зернових елеваторів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. А.В. Жук, «Класифікація технологічних процесів на елеваторах за енергетичними показниками», VIII Всеукраїнська науково-технічна конференція магістрантів і студентів ТДАТУ. Факультет енергетики і комп’ютерних технологій: матеріали VIII Всеукр. наук.-техн. конф., Мелітополь, 2020. С. 64-65.

2. О.В. Бондарчук, О.В. Мазурук, В.Б. Мокін, «Системний аналіз та прогнозування температури зерна у силосі зернового елеватора за даними IoT-системи з використанням технологій штучного інтелекту» Матеріали Всеукраїнської науково-практичної інтернет-конференції «Молодь в науці: дослідження, проблеми, перспективи (МН-2025)», 15-16 червня 2025 р. Режим доступу - https://ir.lib.vntu.edu.ua/bitstream/handle/123456789/48404/25196.pdf?sequence=3&isAllowed=y

3. Системний аналіз стану природних середовищ з урахуванням аномалій / Шмундяк Д. О., Мокін В. Б. // Наукові праці ВНТУ, вип. 4, Груд. 2024. https://doi.org/10.31649/2307-5376-2024-4-63-73

4. Самозігрівання зерна і шляхи його упередження на елеваторі / LUBNYMASH. – 2024. – Режим доступу – https://lubnymash.com/novosti/samozigrivannya-zerna-i-shlyahy-jogo-uperedzhennya-naelevatori

Мазурук Олег Володимирович — аспірант кафедри системного аналізу та інформаційних технологій, Вінницький національний технічний університет, e-mail: omazuruk3@gmail.com.

Мокін Віталій Борисович — д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри системного аналізу та інформаційних технологій, Факультет інтелектуальних інформаційних технологій та автоматизації Вінницького національного технічного університету, e-mail: vbmokin@vntu.edu.ua.

Mazuruk Oleh V. — Post-Graduate Student of the Chair of System Analysis and Information Technologies, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: omazuruk3@gmail.com.

Mokin Vitalii B. — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Head of the Chair of System Analysis and Information Technology, Faculty of Intelligent Information Technologies and Automation of Vinnytsia National Technical University, e-mail: vbmokin@vntu.edu.ua.