

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ СИСТЕМИ ПРОГНОЗУВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ ЗЕРНА: СТАН ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

Розглянуто сучасні підходи до прогнозування температури зерна під час зберігання як ключового чинника забезпечення якості агропродукції. Описано обмеження традиційних методів та переваги інтелектуальних систем — нейронних мереж, нечіткої логіки, гібридних моделей. Окреслено перспективні напрями розвитку, зокрема хмарні технології, цифрові двійники, DSS-системи та агроплатформи. Визначено основні переваги впровадження таких рішень.

Ключові слова: прогнозування температури зерна, інтелектуальні системи, адаптивні моделі, нечітка логіка, нейронні мережі.

Abstract

The modern approaches to forecasting grain temperature during storage as a key factor in ensuring the quality of agricultural products are discussed. The limitations of traditional methods and the advantages of intelligent systems — neural networks, fuzzy logic, and hybrid models — are described. Prospective development directions are outlined, including cloud technologies, digital twins, DSS systems, and agro-platforms. The main benefits of implementing such solutions are identified.

Keywords: grain temperature forecasting, intelligent systems, adaptive models, fuzzy logic, neural networks.

Вступ

Забезпечення належних умов зберігання зерна є критично важливим завданням агропромислового комплексу. Одним із ключових факторів, що впливають на якість та безпеку зберігання, є температура зернової маси. Несвоєчасне реагування на зміни температури може призвести до самозігрівання, втрати якості продукції та економічних збитків. У зв'язку з цим виникає потреба у впровадженні сучасних засобів моніторингу та прогнозування, зокрема інтелектуальних систем.

Результати дослідження

На сьогодні у практиці аграрного сектору застосовується широкий спектр методів прогнозування температури зерна в умовах зберігання. До найпоширеніших належать емпіричні методи, які базуються на статистичних закономірностях, виведених на основі багаторічних спостережень. Такі підходи є простими у реалізації, однак мають низьку гнучкість і не завжди забезпечують високу точність прогнозування в умовах змінного клімату або нестандартних умов зберігання.

Крім того, активно застосовуються фізико-математичні моделі тепло- та масообміну в зерновій масі, які враховують параметри навколишнього середовища, теплоємність зерна, щільність насипу, вентиляційні режими тощо. Ці моделі є більш точними, проте вимагають значної кількості параметрів та складних обчислень, що обмежує їх використання у практичних умовах без автоматизованих систем підтримки[1].

У зв'язку зі швидким розвитком цифрових технологій, зокрема обчислювальної техніки, сенсорних систем та інтернету речей (IoT), спостерігається перехід до більш гнучких та адаптивних інтелектуальних систем прогнозування. Все більше досліджень присвячено впровадженню алгоритмів штучного інтелекту — нейронних мереж, нечіткої логіки, генетичних алгоритмів, дерев рішень та інших методів машинного навчання. Зокрема, нейронні мережі здатні самостійно знаходити складні залежності між вхідними параметрами без необхідності створення жорстко формалізованих математичних моделей[1].

Комбіновані (гібридні) підходи, наприклад нейро-нечіткі системи або нейро-еволюційні моделі, дозволяють об'єднати переваги кількох методів: здатність до навчання та адаптації, обробку нечіткої

або неповної інформації, інтерпретованість результатів. Вони можуть враховувати широкий спектр параметрів, включаючи температуру навколишнього середовища, вологість зерна, рівень вентиляції, атмосферний тиск, швидкість повітряних потоків тощо[2].

Таким чином, сучасна тенденція у сфері прогнозування температури зерна спрямована на інтеграцію інтелектуальних систем у практику зберігання сільськогосподарської продукції, що відкриває нові можливості для створення ефективних, автономних та точних систем моніторингу та управління мікрокліматом у зерносховищах.

Інтелектуальні моделі, зокрема нейронні мережі, системи нечіткої логіки, нейро-нечіткі моделі, методи машинного навчання та гібридні алгоритми, мають суттєві переваги порівняно з традиційними підходами до прогнозування температури зерна. Ці переваги зумовлюють їхнє широке впровадження в аграрну галузь та технології зберігання сільськогосподарської продукції[3].

Інтелектуальні системи можуть навчатися на основі накопичених даних, оновлюючи свою поведінку без потреби ручного втручання. Це дозволяє моделі ефективно реагувати на зміну умов зберігання, сезонні коливання температури, зміну характеристик зерна тощо. Здатність до адаптації є особливо важливою у випадках, коли контроль за всіма зовнішніми параметрами неможливий або економічно недоцільний[2].

На відміну від класичних регресійних моделей, які базуються на лінійних припущеннях, інтелектуальні системи здатні моделювати складні багатовимірні зв'язки між параметрами. Це дозволяє досягти вищої точності прогнозів, особливо в умовах, коли зміни одного параметра можуть спричинити непередбачувані ефекти у температурному режимі.

Завдяки використанню нечіткої логіки та статистичних методів обробки, інтелектуальні моделі можуть ефективно працювати навіть за відсутності повного набору вхідних параметрів або за наявності завад у сенсорних даних. Це критично важливо у польових умовах, де системи збору інформації можуть працювати з перебоями або зниженою точністю[3].

Сучасні інтелектуальні системи легко інтегруються з сенсорними мережами, мікроконтролерами та хмарними платформами, що дозволяє створювати комплексні автоматизовані рішення для моніторингу та керування умовами зберігання зерна в режимі реального часу. Взаємодія з IoT-технологіями також відкриває перспективи дистанційного керування та аналітики на основі великих даних (Big Data).

Завдяки можливості аналізувати широкий спектр параметрів і адаптивно підлаштовуватись до нових даних, інтелектуальні моделі, як правило, демонструють кращу прогностичну здатність порівняно з традиційними методами. Це дозволяє не лише вчасно виявляти ризики перегріву зернової маси, але й оптимізувати енергоспоживання вентиляційних систем.

Таким чином, впровадження інтелектуальних систем у сферу зберігання зерна є обґрунтованим та перспективним кроком, що дозволяє значно підвищити ефективність управління якістю продукції, знизити втрати та забезпечити стабільність постачання на ринку[1].

Подальший розвиток інтелектуальних систем прогнозування температури зерна спрямований на вдосконалення їх точності, надійності та зручності у практичному використанні. З урахуванням світових технологічних трендів, можна виділити кілька ключових напрямів розвитку:

- **Використання гібридних моделей (нейро-нечіткі, нейро-еволюційні, генетично-нейронні тощо).** Такі моделі поєднують сильні сторони різних підходів до обробки даних: адаптивність нейронних мереж, інтерпретованість нечітких правил, оптимізаційні можливості еволюційних алгоритмів. Це дозволяє підвищити точність прогнозування, забезпечити стійкість до шумів у вхідних даних та розширити функціональні можливості систем. У результаті створюються більш універсальні моделі, здатні працювати в різноманітних умовах зберігання.

- **Впровадження хмарних технологій для обробки даних у реальному часі.** Перенесення обчислювального навантаження до хмарних платформ дозволяє значно скоротити вимоги до локального обладнання та забезпечити доступ до аналітики з будь-якої точки світу. Такий підхід відкриває можливість обробки великих масивів даних з багатьох об'єктів одночасно, а також реалізації централізованих систем управління станом зерносховищ.

- **Створення інтелектуальних систем підтримки прийняття рішень (DSS) для операторів зерносховищ.** Такі системи надають не лише прогнози, а й рекомендації щодо дій: необхідність провітрювання, зміна режиму вентиляції, перенесення зерна тощо. Вони можуть враховувати технічні можливості об'єкта, енергоспоживання, прогноз погоди та інші зовнішні фактори. В результаті знижується залежність від людського чинника, підвищується ефективність управління і забезпечується стабільна якість збереженого зерна.

- **Застосування цифрових двійників для моделювання умов зберігання.** Цифрові двійники (Digital Twins) — це віртуальні копії реальних об'єктів, що дозволяють моделювати їхню поведінку в режимі реального часу на основі сенсорних даних. У сфері зберігання зерна цифрові двійники можуть імітувати температуру, вологість, циркуляцію повітря та інші параметри, прогножуючи їх зміну залежно від зовнішніх впливів. Це дозволяє проводити експерименти без ризику для реальної продукції, оперативно реагувати на загрози та планувати оптимальні стратегії зберігання.

- **Інтеграція з іншими компонентами агровиробництва.** Інтелектуальні системи прогнозування можуть бути частиною комплексних агроплатформ, що охоплюють усі етапи ланцюга "вирощування – збирання – зберігання – реалізація". Обмін даними між етапами сприяє підвищенню ефективності всього процесу, кращому плануванню логістики та забезпеченню стабільної якості зерна на виході.

Усе це свідчить про те, що інтелектуальні технології поступово трансформують галузь зберігання сільськогосподарської продукції, роблячи її більш надійною, енергоефективною та прогнозованою. Їх активне впровадження дозволить аграрним підприємствам ефективніше реагувати на виклики ринку, зменшити втрати продукції та підвищити свою конкурентоспроможність.

Висновки

Інтелектуальні системи прогнозування температури зерна є перспективним інструментом для підвищення ефективності зберігання та мінімізації ризиків, пов'язаних із псуванням продукції, самозігріванням зернової маси та втратами якості. Завдяки здатності до адаптації, самонавчання та роботи з великою кількістю різнопланових даних, такі системи мають значний потенціал для інтеграції в сучасні логістичні та управлінські процеси аграрної галузі.

Подальші дослідження у цьому напрямку сприятимуть не лише підвищенню точності прогнозування та надійності технологічних процесів, а й активному впровадженню цифрових технологій в аграрному секторі. Розвиток гібридних моделей, цифрових двійників, систем підтримки прийняття рішень та хмарних сервісів забезпечить перехід до більш автоматизованих, енергоефективних і безпечних систем зберігання сільськогосподарської продукції, що є важливою складовою стратегії сталого розвитку аграрної економіки.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Q. Wang, M. Hou, Y. Qin and F. Lian, "Temperature Forecasting of Grain in Storage: An Improved Approach Based on Broad Learning Network," in IEEE Access, vol. 12, pp. 115112-115123, 2024.
2. Zhang, Q.; Zhang, W.; Huang, Q.; Wan, C.; Li, Z. AMSformer: A Transformer for Grain Storage Temperature Prediction Using Adaptive Multi-Scale Feature Fusion. Agriculture 2025, 15, 58.
3. Cui, H.; Zhang, Q.; Zhang, J.; Wu, Z.; Wu, W. Classification of Grain Storage Inventory Modes Based on Temperature Contour Map of Grain Bulk Using Back Propagation Neural Network. Agriculture 2021, 11, 451.

Лішчук Андрій Романович – студент групи 174-23а, факультет інтелектуальних інформаційних технологій та автоматизації, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail : a.r.lishchuk@gmail.com

Науковий керівник: **Дубовий Володимир Михайлович** - д-р. техн. наук, професор кафедри комп'ютерних систем управління, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця.

Lishchuk Andrii R. – student of 174-23a group, Faculty of Intelligent Information Technologies and Automation, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail : a.r.lishchuk@gmail.com

Supervisor: **Dubovoi Volodymyr** – Dr. Sc. (Eng.), Professor of Computer Control Systems Department, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia.