

<https://doi.org/10.31891/2307-5732-2026-365-83>

УДК 004.85:664.723

МОРОЗ ІГОР

Вінницький національний технічний університет

<https://orcid.org/0009-0004-9241-5859>

e-mail: moroz.i.i@vntu.edu.ua

ЮХИМЧУК МАРІЯ

Вінницький національний технічний університет

<https://orcid.org/0000-0002-8131-9739>

e-mail: umc1987@vntu.edu.ua

АНАЛІЗ ТА ПОРІВНЯННЯ МЕТОДІВ ПРОГНОЗУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ВИРОБНИЧИХ ПРОЦЕСІВ СУШІННЯ ЗЕРНОВИХ КУЛЬТУР

У статті проведено систематичний аналіз та порівняння методів прогнозування параметрів виробничих процесів сушіння зернових культур. Розглянуто методи статистичного прогнозування, фізичного моделювання, нейронних мереж, нечіткої логіки та адаптивних нейро-нечітких систем виведення, а також гібридні підходи. Для кожного класу методів охарактеризовано переваги та обмеження при застосуванні до задач управління сушінням зерна. Показано, що класичні методи (ARIMA, PID-регулятори) не забезпечують достатньої точності через нелінійну та нестационарну природу процесу. Підходи на основі нечіткої логіки та ANFIS демонструють можливість інтерпретованого управління зі скороченням числа параметрів моделі. Методи глибокого навчання (LSTM, GRU, GCN+Transformer) забезпечують ефективне моделювання просторово-часових залежностей температурного поля. Гібридні підходи, зокрема поєднання механістичних та дата-д্রивних методів, дозволяють досягнути максимального відхилення вологості на виході не більше $\pm 0,58-0,3\%$. Наведено порівняльну таблицю методів та структурну схему класифікації. Зроблено висновки про доцільність розробки інтелектуальних гібридних систем прогнозування для задач управління зерновими сушарками.

Ключові слова: прогнозування параметрів, сушіння зерна, нейронні мережі, нечітка логіка, ANFIS, глибоке навчання.

MOROZ IHOR, YUKHYMCHUK MARIIA

Vinnitsia National Technical University

ANALYSIS AND COMPARISON OF METHODS FOR FORECASTING THE PARAMETERS OF GRAIN DRYING PRODUCTION PROCESSES

The paper presents a systematic analysis and comparison of methods for forecasting parameters of grain drying production processes. Physical modeling of the grain drying process is based on equations of simultaneous heat and mass transfer. Such models allow to describe the spatial distribution of temperature and humidity in the grain layer and are theoretically justified. At the same time, their practical application in control systems is associated with high computational complexity due to the need for numerical solution of systems of differential equations in real time. An additional problem is the sensitivity of physical models to boundary conditions and parameters, the values of which in practice can significantly differ from idealized ones. The difficulties of accurate measurement of some parameters (diffusion coefficients, thermal conductivity of wet grain) in real industrial conditions reduce the reliability of forecasts. The methods considered include statistical forecasting, physical modelling, neural networks, fuzzy logic and adaptive neuro-fuzzy inference systems, and hybrid approaches. For each class of methods, advantages and limitations in application to grain drying control tasks are characterised. It is shown that classical methods (ARIMA, PID controllers) do not provide sufficient accuracy due to the nonlinear and non-stationary nature of the process. Fuzzy logic and ANFIS-based approaches demonstrate the possibility of interpretable control with a reduction in the number of model parameters. Deep learning methods (LSTM, GRU, GCN+Transformer) provide effective modelling of spatio-temporal dependencies of the temperature field. Hybrid approaches, in particular the combination of mechanistic and data-driven methods, allow achieving a maximum moisture deviation at the outlet within $\pm 0.58-0.3\%$. A comparative table of methods and a classification block diagram are provided. The conclusion is drawn on the expediency of developing intelligent hybrid forecasting systems for grain dryer control tasks. The article systematises key results of published research and identifies directions for further development in intelligent drying control systems.

Keywords: parameter forecasting, grain drying, neural networks, fuzzy logic, ANFIS, deep learning.

Стаття надійшла до редакції / Received 11.02.2026

Прийнята до друку / Accepted 11.03.2026

Опубліковано / Published 28.05.2026



This is an Open Access article distributed under the terms of the [Creative Commons CC-BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

© Мороз Ігор, Юхимчук Марія

Постановка проблеми у загальному вигляді

та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Сушіння зернових культур є критично важливим етапом постзбирального оброблення, що безпосередньо визначає збереженість і якість зерна. Процес характеризується нелінійною динамікою, значними транспортними затримками, мультидистурбансними збуреннями та параметричною невизначеністю, що суттєво ускладнює розроблення ефективних систем управління. Традиційні підходи до прогнозування – статистичні моделі та класичні PID-регулятори – не забезпечують достатньої якості управління в умовах змінних режимів роботи.

Упродовж останніх років відбувся значний прогрес у застосуванні методів штучного інтелекту та машинного навчання для задач управління зерносушарками. Водночас у літературі відсутній систематичний порівняльний аналіз різних класів методів з урахуванням специфіки задач прогнозування параметрів сушіння зерна. Метою цієї статті є проведення такого аналізу та формування рекомендацій щодо вибору методу для конкретних умов застосування.

Аналіз досліджень та публікацій

Нечітке керування зерносушарками вивчається ще з початку 1990-х рр. Зокрема, Zhang та Litchfield [4] розробили систему нечіткого управління лабораторною протитечійною зерносушаркою, у якій нечіткий регулятор дозволив підтримати вихідну вологість кукурудзи на рівні, порівнянному з ручним управлінням, водночас суттєво знизивши схильність зерна до дроблення. Робота заклала основи застосування нечіткої логіки у цій галузі.

Lutfy et al. [5] запропонували нелінійну ANFIS-модель для конвеєрної зерносушарки на основі даних реального часу, отриманих при сушінні падрі. Ключовою перевагою методу стало скорочення числа параметрів ANFIS-контролера з 385 до 49 за рахунок спрощеної PID-подібної архітектури, навченої генетичним алгоритмом. Пізніше ті ж автори [6] розвинули цей підхід, застосувавши спрощений тип-2 нейро-нечіткий контролер, що продемонстрував ефективне інтелектуальне моделювання та управління конвеєрною сушаркою.

Liu et al. [7] запропонували метод управління безперервним сушінням зерна на основі механізму еквівалентної накопиченої температури (EAT) у поєднанні зі штучним інтелектом. Метод реалізує подвійне механістично-дата-дрийне управління через взаємне «вікно» параметрів та забезпечує максимальне відхилення вологості на виході сушарки в межах $-0,58...+0,3\%$.

Ефективність методів глибокого навчання для керування зерносушарками продемонстрували Zhang et al. [6], де запропоновано стратегію предиктивного управління на основі глибокого навчання (DL-MPC) для промислової багатоступеневої протитечійної рисової сушарки. Навчена на даних LSTM-мережа замінює ітераційну оптимізацію класичного MPC, що суттєво знижує обчислювальні витрати; середня абсолютна похибка між прогнозованою та реальною вологістю падрі склала $0,190\%$ с.с.

Sun et al. [2] запропонували модель C-ERBF, що поєднує теорію хаосу та вдосконалену RBF-нейромережу для прогнозування температури зерна в сховищі. Метод використовує реконструкцію фазового простору для виявлення прихованих динамічних закономірностей часового ряду; експериментально підтверджено вищу точність прогнозування порівняно з іншими методами часових рядів.

Qu et al. [3] розробили модель CGTNs, що поєднує графові згорткові мережі (GCN) та Transformer для прогнозування температурного поля у зерносховищі. GCN фіксує просторові кореляції сенсорів і топологічну структуру сенсорної мережі, тоді як Transformer моделює короткострокові і довгострокові часові залежності. Ключова перевага CGTNs — можливість одночасного прогнозування значень у всіх точках вимірювання, тоді як попередні моделі обмежувалися одним репрезентативним сенсором. На основі прогнозованих значень за допомогою тривимірної інтерполяції формується безперервне температурне поле, що дає змогу оцінювати температуру і в несенсорних зонах. Модель перевищує LSTM, CNN-LSTM, T-GCN та ConvLSTM за показниками точності на реальних даних.

Bardavelidze et al. [8] вперше реалізували нейромережний регулятор NARMA L2 для управління відносною вологістю в конвеєрній сушарці фруктів у реальному часі. Порівняно з класичним PID-регулятором NARMA L2 продемонстрував скорочення часу перехідного процесу на 57% та зменшення перерегулювання на 74%, що підтвердило перспективність нейромережевого управління для харчопромислових сушарок.

Mao et al. [9] запропонували алгоритм GRU Deep Fusion для прогнозування температури зерна, що вирішує проблему розрідженості та зашумленості даних сенсорів зерносховища. Для генерації ознак з метеорологічних даних і оптимізації їхньої мінливості застосовується мультиваріантна лінійна регресія, а для шумозаглушення — вейвлет-фільтрація. В ролі основної архітектури прогнозування застосовується GRU — різновид LSTM, що ефективно обробляє часові ряди. Запропонований метод продемонстрував кращу точність і швидкодію порівняно з LSTM, GRU без злиття і Transformer.

Формулювання цілей статті

Метою роботи є: проведення систематичного аналізу та порівняння сучасних методів прогнозування параметрів виробничих процесів сушіння зернових культур; дослідження особливостей застосування статистичних моделей, фізичних підходів, методів нечіткої логіки, нейронних мереж та адаптивних нейро-нечітких систем для задач прогнозування температури та вологості зерна; визначення переваг і обмежень різних класів методів з урахуванням нелінійності та нестационарності процесу сушіння; обґрунтування доцільності використання інтелектуальних і гібридних моделей прогнозування для підвищення ефективності систем управління зерносушарками.

Виклад основного матеріалу

До класичних підходів відносяться моделі авторегресії з інтегрованими ковзними середніми (ARIMA) та методи експоненційного згладжування Хольта-Вінтерса. Ці методи легко реалізуються і потребують невеликої кількості параметрів, що є перевагою при обмеженому обсязі даних. Проте їх принципова обмеженість полягає в припущенні лінійності та стаціонарності часового ряду.

Процес сушіння зерна є суттєво нелінійним: теплофізичні властивості зерна змінюються в ході сушіння, а залежність між керуючими впливами і вихідними параметрами не є постійною. За цих умов статистичні методи забезпечують задовільну точність лише при незначних відхиленнях режимних параметрів від номінального режиму. Традиційні PID-регулятори, попри широке застосування в промисловості, також схильні до перерегулювання і коливань у нелінійних умовах, що знижує якість управління.

1. Фізичні моделі

Фізичне моделювання процесу сушіння зерна базується на рівняннях одночасного тепло- і масопереносу. Такі моделі дозволяють описати просторовий розподіл температури і вологості в шарі зерна та є теоретично

обґрунтованими. Поряд з тим, їх практичне застосування в системах управління пов'язане з високою обчислювальною складністю через необхідність числового розв'язання систем диференціальних рівнянь у реальному часі.

Додатковою проблемою є чутливість фізичних моделей до граничних умов та параметрів, значення яких на практиці можуть суттєво відрізнятися від ідеалізованих. Труднощі точного вимірювання деяких параметрів (коефіцієнтів дифузії, теплопровідності вологого зерна) у реальних промислових умовах знижують достовірність прогнозів.

2. Методи на основі нейронних мереж

Методи нейронних мереж, зокрема рекурентні архітектури LSTM та GRU, демонструють значні переваги при моделюванні часових залежностей у даних сушіння. Вони здатні автоматично виявляти нелінійні закономірності та не потребують явного задання математичної моделі процесу. Водночас ці методи є «чорними скриньками» з обмеженою інтерпретованістю, що може ускладнювати їх застосування у відповідальних промислових системах.

Просторово-часові архітектури, такі як поєднання GCN і Transformer, розширюють можливості прогнозування температурного поля в зерносушарці, враховуючи не лише тимчасові, а й просторові кореляції між сенсорами. Проте складність цих архітектур вимагає значних обчислювальних ресурсів та більших обсягів навчальних даних.

3. Методи нечіткої логіки та ANFIS

Нечітка логіка надає ефективний інструментарій для формалізації та використання експертних знань у вигляді лінгвістичних правил. Її перевагою є висока інтерпретованість результатів та стійкість до шумів у вхідних даних. Нечітке управління зерносушарками продемонструвало можливість підтримки вологості продукту без суттєвого збільшення механічного пошкодження зерна [4].

Адаптивні нейро-нечіткі системи виведення (ANFIS) поєднують гнучкість нейромережного навчання з інтерпретованістю нечіткої логіки. Застосування ANFIS із навчанням через генетичний алгоритм дозволило суттєво скоротити число параметрів контролера без погіршення якості управління [5]. Обмеженням методу є «прокляття розмірності» – складність масштабування на задачі з великою кількістю входів.

Таблиця 1

Порівняння методів прогнозування параметрів сушіння зерна

Метод	Переваги	Недоліки	Застосування	Джерело
ARIMA / Хольта-Вінтерса	Проста реалізація, мала кількість параметрів	Лінійна модель, не враховує нелінійності процесу	Короткострокове прогнозування з лінійними трендами	–
Нечітка логіка (FLC)	Інтерпретовані лінгвістичні правила, стійкість до шуму	Складність масштабування при збільшенні входів	Регулювання вологості зерна на виході сушарки	[4]
ANFIS	Поєднує нечіткі правила з навчанням, зменшення числа параметрів	Складне налаштування, чутливість до початкових умов	Моделювання та керування конвеєрними сушарками	[5]
RBF-мережа (C-ERBF)	Висока точність при нелінійних залежностях, хаотична реконструкція фазового простору	Потребує оптимізації гіперпараметрів	Прогнозування температури зернового насипу	[2]
LSTM / GRU	Ефективне моделювання часових залежностей	Обчислювальна складність, потреба у великих даних	Прогнозування вологості та температури зерна	[3, 6, 7]
GCN + Transformer	Просторово-часова модель, багатоточкові прогнози	Складна архітектура, потребує топології сенсорів	Просторово-розподілені прогнози температурного поля	[3]
DL-MPC (LSTM)	Зменшення обчислювальних витрат MPC, промисловий масштаб	Залежність від якості навчальних даних	Промислові багатоступеневі протитечійні рисові сушарки	[6]
Нейромережа NARMA L2	Реальний час, стійкість до збурень, малий час перехідного процесу	Вимагає ретельного налаштування моделі передатної функції	Регулювання відносної вологості в камері сушіння фруктів	[8]

Таблиця 2

Класифікаційна схема методів прогнозування процесів сушіння зерна

Вхідні дані	→	Методи прогнозування	→	Прогноз виходу
		Статистичні (ARIMA, Хольта-Вінтерса)		Температура зерна
Температура повітря, вологість, швидкість потоку	↓	Фізичні (моделі тепломасообміну)	↓	Вологість на виході
		Нейронні мережі (LSTM, GRU, CNN-LSTM)		Оцінка якості зерна
Просторові координати сенсорів		Нечітка логіка та ANFIS		
		Гібридні моделі (DL-MPC, NARMA L2)		

Висновки з даного дослідження

і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

1. Класичні статистичні методи (ARIMA, Хольта-Вінтерса) та PID-регулятори не забезпечують достатньої точності управління через нелінійну та нестационарну природу процесу сушіння зерна, що підтверджується аналізом літературних джерел.
2. Методи нечіткої логіки та ANFIS забезпечують інтерповане управління і демонструють можливість суттєвого скорочення числа параметрів моделі, однак їх масштабування обмежено числом вхідних змінних.
3. Методи глибокого навчання (LSTM, GRU, GCN+Transformer) ефективно моделюють просторово-часові залежності температурного поля у зерносховищах і демонструють переваги над статистичними методами на реальних промислових даних.
4. Гібридні підходи, що поєднують механістичне та дата-д্রивне управління, дозволяють досягнути максимального відхилення вологості на виході сушарки в межах $\pm 0,58-0,3\%$ [7] та суттєво знизити обчислювальні витрати предиктивного управління при збереженні якості прогнозу [6]. Перспективним є розвиток таких систем з використанням просторово-часових нейромережових архітектур.

Література

1. Baidhe E., Clementson C. L. A review of the application of modeling and simulation to drying systems for improved grain and seed quality. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2024. Vol. 222. Art. 109094. DOI: 10.1016/j.compag.2024.109094
2. Sun F., Gong C., Lyu Z. Grain storage temperature prediction based on chaos and enhanced RBF neural network. *Scientific Reports*. 2024. Vol. 14. Art. 24015. DOI: 10.1038/s41598-024-74120-1
3. Qu M., Liu J., Duan S., Sun S. Temperature forecasting of grain in storage: A multi-output and spatiotemporal approach based on deep learning. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2023. Vol. 208. Art. 107785. DOI: 10.1016/j.compag.2023.107785
4. Zhang Q., Litchfield J. B. Fuzzy logic control for a continuous crossflow grain dryer. *Journal of Food Process Engineering*. 1993. Vol. 16, № 1. P. 59–77. DOI: 10.1111/j.1745-4530.1993.tb00162.x
5. Lutfy O. F., Noor S. B. M., Marhaban M. H., Abbas K. A. Non-linear modelling and control of a conveyor-belt grain dryer utilizing neuro-fuzzy systems. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering*. 2011. Vol. 225. DOI: 10.1177/2041304110394559
6. Zhang Y., Fang Z., Li C., Li C. Deep-learning-based model predictive control of an industrial-scale multistate counter-flow paddy drying process. *Foods*. 2024. Vol. 13, № 1. Art. 43. DOI: 10.3390/foods13010043
7. Liu Z., Xu Y., Han F., Zhang Y., Wang G., Wu Z., Wu W. Control method for continuous grain drying based on equivalent accumulated temperature mechanism and artificial intelligence. *Foods*. 2022. Vol. 11, № 6. Art. 834. DOI: 10.3390/foods11060834
8. Bardavelidze A., Bardavelidze Kh., Sesikashvili O. Synthesis and research of the intelligent automatic control system for a fruit drying apparatus. *Scifood*. 2025. Vol. 19, № 1. P. 343–359. DOI: 10.5219/scifood.42
9. Mao B., Tao S., Li B. Grain temperature prediction based on GRU deep fusion model. *International Journal of Information Technology & Decision Making*. 2025. Vol. 24, № 3. P. 797–815. DOI: 10.1142/S0219622023410031
10. Lutfy O. F., Selamat H., Noor S. B. M. Intelligent modeling and control of a conveyor belt grain dryer using a simplified type 2 neuro-fuzzy controller. *Drying Technology*. 2015. Vol. 33, № 10. P. 1210–1222. DOI: 10.1080/07373937.2015.1021007