

КООРДИНАЦІЙНЕ КЕРУВАННЯ БАГАТОЗОННОЮ ШАХТНОЮ ЗЕРНОСУШАРКОЮ НА ОСНОВІ ПРОГНОЗУВАЛЬНОЇ NARX-МОДЕЛІ ТА ANFIS- КООРДИНАТОРА

Мороз Ігор Ігорович,

аспірант кафедри комп'ютерних систем управління
Вінницький національний технічний університет

Юхимчук Марія Сергіївна,

доктор технічних наук, професор кафедри комп'ютерних систем управління
Вінницький національний технічний університет

Анотація: У роботі запропоновано структуру координаційного керування процесом сушіння зерна у двошахтній шестизонній шахтній зерносушарці, що поєднує прогнозувальну NARX-модель цифрового двійника та ANFIS-координатор зональних уставок. NARX-модель прогнозує майбутню вихідну вологість з урахуванням історії параметрів процесу і транспортного запізнення, а ANFIS формує узгоджені корекції температури нагрівальних зон, інтенсивності повітрообміну та швидкості руху зерна. Для явного врахування технологічних обмежень базову дію координатора доповнено локальним вибором допустимого керуючого впливу за інтегральним критерієм. Модельна перевірка показала, що варіанти з верхньорівневою координацією забезпечили досягнення цільового діапазону вологості у трьох із трьох стрес-сценаріїв, тоді як базовий режим - у двох із трьох. Інтегрований варіант додатково зменшив нормовану енергетичну складову, керуюче зусилля та максимальну температуру зерна порівняно з NARX + ANFIS без додаткового вибору кандидата.

Ключові слова: зерносушарка, сушіння зерна, координаційне керування, цифровий двійник, NARX, ANFIS, прогнозування вологості, технологічні обмеження.

Сушіння зерна є енергоємним та інерційним технологічним процесом, для якого кінцева якість визначається не тільки поточними параметрами сушильного агента, а й попередньою історією нагрівання, охолодження та руху зернового потоку. Для шахтних сушарок додаткове значення мають просторовий розподіл параметрів, внутрішня міграція вологи та транспортне запізнення між зміною керуючого впливу і реакцією вихідної вологості [1, 2]. За таких умов локальна стабілізація температури окремих зон не гарантує досягнення заданої вологості на виході, тому доцільним є формування верхнього рівня прогнозування та координації керування.

У роботі розглянуто двошахтну шестизонну зерносушарку безперервної дії з послідовним проходженням зерна через стадії нагрівання, охолодження/темперування та фінального охолодження. Об'єкт керування характеризується взаємним впливом зон: зміна температури сушильного агента,

інтенсивності повітрообміну або швидкості руху зерна впливає на вихідну вологість із запізненням і змінює умови роботи наступних зон. Це обумовлює необхідність узгодженого формування зональних уставок замість незалежного регулювання кожного локального контуру.

Запропонована структура координаційного керування поєднує прогнозувальну NARX-модель цифрового двійника та ANFIS-координатор верхнього рівня. NARX належить до класу нелінійних авторегресійних моделей із зовнішніми входами і дає змогу враховувати історію вхідних та вихідних сигналів, що є суттєвим для динамічних об'єктів із пам'яттю та транспортними запізненнями [3]. У розробленій структурі NARX формує прогноз майбутньої вихідної вологості зерна за часовими рядами параметрів процесу, а прогнозоване відхилення від цільового діапазону використовується як одна з основних координат для верхньорівневого керування.

ANFIS використовується не як окрема модель прогнозування, а як координатор зональних уставок. Нейро-нечітка система формує базові корекції температури нагрівальних зон, інтенсивності повітрообміну та швидкості руху зерна. Така постановка дозволяє поєднати апроксимувальні властивості адаптивних нейро-нечітких систем [4] з прогнозом майбутнього стану об'єкта. Локальні контури ПЛК при цьому залишаються нижнім рівнем системи та виконують стабілізацію заданих параметрів, обмеження швидкості зміни керуючих сигналів і технологічний захист.

Для врахування кількох вимог до режиму сушіння базова дія ANFIS доповнюється локальним вибором допустимого кандидата. Навколо сформованої ANFIS-корекції створюється обмежена множина альтернативних керуючих дій. Для кожного кандидата оцінюються прогнозована кінцева вологість, максимальна температура зерна, нормована енергетична складова та продуктивність. Варіанти, що порушують жорсткі технологічні обмеження за вологістю або температурою, відкидаються, а серед допустимих обирається дія за інтегральним критерієм. Таким чином, прогноз, нейро-нечітка координація та технологічні обмеження працюють як єдина послідовність формування керуючого впливу.

Модельну перевірку виконано для трьох стрес-сценаріїв із порівнянням базового режиму без верхньої координації, варіанта NARX + ANFIS та інтегрованого варіанта NARX + ANFIS із додатковим вибором допустимого кандидата. Основні результати наведено в таблиці 1. Нормована енергетична складова J_E та нормоване керуюче зусилля використані як порівняльні показники всередині сформованої імітаційної бази; вони не ототожнюються з промисловими показниками енергоспоживання реальної сушарки.

Таблиця 1.

Результати порівняльної модельної перевірки

Варіант керування	Успішні сценарії	J_E	Керуюче зусилля
Базовий режим	2/3	1,000	0,000
NARX + ANFIS	3/3	1,414	0,468
NARX + ANFIS + J	3/3	1,265	0,335

Базовий режим забезпечив потрапляння кінцевої вологості у цільовий діапазон у двох із трьох перевірених сценаріїв. Обидва варіанти з верхньорівневою координацією забезпечили допустимий результат у трьох із трьох сценаріїв. Для NARX + ANFIS середнє відхилення кінцевої вологості від середини цільового діапазону становило 0,179 в.п., а максимальна температура зерна – 34,76 °С. Додавання вибору кандидата за інтегральним критерієм збільшило відхилення від середини діапазону до 0,364 в.п., однак зменшило нормовану енергетичну складову з 1,414 до 1,265, керуюче зусилля з 0,468 до 0,335 та максимальну температуру зерна до 34,38 °С.

Отриманий результат показує, що інтегрований варіант не є універсально кращим за всіма показниками. Його перевага в межах проведеної модельної перевірки полягає у можливості явного компромісу між точністю центрування вологості, температурною безпечністю, інтенсивністю керуючих дій, енергетичною складовою та продуктивністю. При цьому NARX + ANFIS без додаткового вибору кандидата забезпечив найменше середнє відхилення від середини цільового діапазону. Отже, додатковий критерій доцільно трактувати як механізм вибору допустимого режиму відповідно до заданих пріоритетів, а не як гарантію глобально оптимальної траєкторії.

Практична реалізація запропонованої структури передбачає багаторівневу архітектуру. NARX і ANFIS можуть виконуватися на локальному обчислювальному рівні, де формується прогноз і корекція уставок, тоді як ПЛК забезпечує безпосереднє відпрацювання команд та аварійні блокування. HMI/SCADA-рівень використовується для візуалізації параметрів процесу, стану прогнозувальної моделі та сформованих керуючих впливів. Такий поділ функцій відповідає загальній логіці цифрових двійників, у яких модельний компонент доповнює, а не замінює фізичний об'єкт і його локальну систему автоматизації [5].

Таким чином, запропонована структура координаційного керування поєднує прогноз майбутньої вихідної вологості, нейро-нечітке формування зональних корекцій та явне врахування технологічних обмежень. Модельна перевірка підтвердила працездатність підходу в межах сформованої імітаційної бази та показала перевагу верхньорівневої координації за кількістю успішних стрес-сценаріїв. Подальше застосування методу для конкретної промислової зерносушарки потребує узгодження сенсорного простору, донавчання прогнозувальної моделі на натурних часових рядах та експериментальної перевірки сформованих керуючих рішень.

Список літератури

1. Brooker D. B., Bakker-Arkema F. W., Hall C. W. Drying and Storage of Grains and Oilseeds. New York: Van Nostrand Reinhold, 1992.
2. Miraei Ashtiani S.-H., Martynenko A. Toward intelligent food drying: Integrating artificial intelligence into drying systems. Drying Technology. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1080/07373937.2024.2356177>.
3. Leontaritis I. J., Billings S. A. Input-output parametric models for non-linear systems. Part I: deterministic non-linear systems. International Journal of Control. 1985. Vol. 41, No. 2. P. 303-328. DOI: <https://doi.org/10.1080/0020718508961129>.
4. Jang J.-S. R. ANFIS: adaptive-network-based fuzzy inference system. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. 1993. Vol. 23, No. 3. P. 665-685. DOI: <https://doi.org/10.1109/21.256541>.
5. Fuller A., Fan Z., Day C., Barlow C. Digital Twin: Enabling Technologies, Challenges and Open Research. IEEE Access. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2998358>.
6. Мороз І. І., Юхимчук М. С. Аналіз та порівняння методів прогнозування параметрів виробничих процесів сушіння зернових культур. Herald of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences. 2026. Vol. 365, No. 3. P. 595-598. DOI: <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2026-365-83>.