

Г. В. ГРИГОРЧУК

доктор філософії, доцент,
доцент кафедри фізико-математичних наук
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
ORCID: 0000-0003-1674-9828

Л. І. ГРИГОРЧУК

кандидат педагогічних наук, доцент,
доцент кафедри інженерії програмного забезпечення
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
ORCID: 0000-0003-0924-5090

О. В. ГРИГОРЧУК

аспірантка кафедри інженерії програмного забезпечення
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
ORCID: 0009-0006-8770-6314

НЕЙРОМЕРЕЖЕВИЙ SOFT-SENSOR ДЛЯ КОМП'ЮТЕРНОЇ ДІАГНОСТИКИ ВОЛОГОСТІ

У статті розглянуто задачу комп'ютерної діагностики процесу сушіння утфелю в барабанній сушарці цукрового виробництва. Однією з основних проблем автоматизації даного процесу є відсутність можливості безперервного прямого вимірювання вихідної вологості утфелю в реальному часі, що ускладнює підтримання оптимального режиму сушіння та негативно впливає на якість кінцевого продукту.

Запропоновано нейромережевий soft-sensor, призначений для непрямого оцінювання прихованої вологості утфелю на основі вимірюваних технологічних параметрів процесу сушіння. Особливістю запропонованого підходу є поєднання регресійної оцінки вологості з класифікацією технологічних станів процесу сушіння в межах єдиної нейромережевої моделі. Це дозволяє не лише визначати кількісні показники якості продукту, але й здійснювати діагностику режимів роботи сушильної установки.

Нейромережевий soft-sensor побудовано на основі багатошарового перцептрона, який реалізує нелінійну апроксимацію залежності між вектором вимірюваних технологічних параметрів та прихованими станами процесу сушіння. Для врахування інерційних властивостей об'єкта формується розширений вектор ознак із використанням ковзного діагностичного вікна. Класифікаційний вихід моделі реалізовано із застосуванням Softmax-нормалізації, що забезпечує інтерпретацію результатів у вигляді ймовірностей технологічних станів.

Показано концепцію інтеграції нейромережевого soft-sensor 'а в систему автоматичного керування барабанною сушаркою з PID-регулятором шляхом адаптації температурної уставки сушіння. Запропонований підхід створює передумови для підвищення стабільності технологічного процесу, зменшення енергетичних витрат і зниження впливу людського фактора.

Ключові слова: сушіння утфелю, комп'ютерна діагностика, нейронна мережа, soft-sensor, автоматичне керування.

G. V. GRYGORCHUK

Doctor of Philosophy, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Physical and Mathematical Sciences
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas
ORCID: 0000-0003-1674-9828

L. I. GRYGORCHUK

Candidate of Pedagogical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Software Engineering
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas
ORCID: 0000-0003-0924-50906



O. V. HRYHORCHUK

Postgraduate Student at the Department of Software Engineering

Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas

ORCID: 0009-0006-8770-6314

NEURAL NETWORK SOFT-SENSOR FOR COMPUTER-BASED MOISTURE DIAGNOSTICS

The paper addresses the problem of computer-based diagnostics of the massecuite drying process in a drum dryer used in sugar production. One of the main challenges in automating this process is the lack of reliable real-time measurement of the outlet moisture content of massecuite, which complicates the maintenance of optimal drying conditions and adversely affects product quality.

A neural network-based soft sensor is proposed for indirect estimation of the hidden moisture content of massecuite using measured technological process parameters. The distinctive feature of the proposed approach is the integration of moisture regression estimation with classification of technological drying states within a single neural network model. This enables not only quantitative assessment of product quality but also diagnostic identification of operating modes of the drying unit.

The soft sensor is implemented using a multilayer perceptron that performs nonlinear approximation of the relationship between the vector of measured technological parameters and the hidden states of the drying process. To account for process inertia, an extended feature vector is formed using a sliding diagnostic window. The classification output of the model is implemented using Softmax normalization, providing probabilistic interpretation of technological drying states.

The concept of integrating the neural network soft sensor into an automatic control system with a PID controller is presented through adaptation of the drying temperature setpoint. The proposed approach creates prerequisites for improving process stability, reducing energy consumption, and minimizing the influence of the human factor in industrial massecuite drying operations.

Key words: massecuite drying, computer diagnostics, neural network, soft sensor, automatic control.

Постановка проблеми

Процес сушіння утфелю є одним із ключових етапів технологічного циклу виробництва цукру, який суттєво впливає на якість кінцевого продукту та енергетичну ефективність виробництва. Барабанні сушарки, що широко використовуються на цукрових заводах, характеризуються складною тепломасообмінною динамікою, значною інерційністю та чутливістю до змін властивостей вхідної сировини [1–5].

Однією з основних проблем автоматизації процесу сушіння є відсутність надійних засобів безперервного контролю вологості утфелю в реальному часі. У промислових умовах вологість готового продукту зазвичай оцінюється лабораторними методами або за непрямыми ознаками, що призводить до запізнення керуючих дій та нестабільності технологічного режиму. У результаті зростають теплові втрати, погіршується якість кристалів цукру та підвищується залежність процесу від кваліфікації оператора [1, 5, 8]. Сучасні тенденції розвитку систем автоматизованого керування спрямовані на використання методів комп'ютерної діагностики та інтелектуального аналізу даних, зокрема нейромережових моделей. Одним із перспективних підходів є застосування віртуальних датчиків (soft-sensor'ів), які дозволяють відновлювати приховані параметри технологічного процесу на основі доступних вимірюваних сигналів [11, 15]. У даній статті запропоновано нейромережовий soft-sensor для діагностики вологості утфелю в барабанній сушарці. На відміну від класичних методів контролю, запропонований підхід поєднує кількісну оцінку вологості з діагностикою технологічних станів процесу, що створює основу для адаптивного автоматичного керування сушінням.

Формулювання мети дослідження

Метою даної роботи є розроблення нейромережового soft-sensor'а для комп'ютерної діагностики процесу сушіння утфелю в барабанній сушарці, який забезпечує непряме оцінювання вихідної вологості продукту в режимі реального часу та може бути інтегрований у систему автоматичного керування для підвищення стабільності технологічного процесу і якості кінцевого продукту.

Наукова новизна роботи полягає в тому, що:

- запропоновано нейромережовий soft-sensor для процесу сушіння утфелю в барабанній сушарці, який здійснює непряме оцінювання вихідної вологості на основі вимірюваних технологічних параметрів процесу.
- реалізовано поєднання регресійної оцінки вологості з діагностикою технологічних станів процесу сушіння в межах єдиної нейромережової моделі, що підвищує інформативність комп'ютерної діагностики.
- запропоновано концепцію інтеграції нейромережового soft-sensor'а в контур автоматичного керування барабанною сушаркою з використанням адаптації температурної уставки сушіння.
- розроблено структурну схему діагностично-орієнтованої системи керування, яка не потребує радикальної перебудови існуючих PID-контурів і може бути реалізована як надбудова над традиційними системами автоматизації

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Автоматизація процесів сушіння в промисловості традиційно спирається на вимірювання доступних технологічних параметрів (температури, витрати, тиску) та їх використання в замкнених контурах регулювання, найчастіше на основі PID-регуляторів. Однак для ряду технологічних об'єктів ключові показники якості (зокрема вологість продукту) залишаються важко вимірюваними в реальному часі, що стимулює розвиток непрямих методів оцінювання та комп'ютерної діагностики [1, 8, 11].

Одним із перспективних напрямів є застосування **soft-sensor'ів** (віртуальних датчиків), які відновлюють приховані параметри на основі вимірюваних сигналів. Зокрема, у роботі [12] запропоновано пояснювану нейромережеву модель (explainable ANN) як soft-sensor для прогнозування вологості в неперервному виробничому процесі без прямого вимірювання, із використанням параметрів процесу як входів моделі. Показано, що нейромережевий підхід може забезпечувати точне оцінювання вологості як критичної якісної характеристики, а також бути інтерпретованим засобами пояснюваного аналізу (XAI). Ще одним важливим напрямом є використання нейромереж як складової прогнозованого керування (MPC/NMPC) сушильними процесами. У класичній роботі [13] нейронні мережі застосовано для побудови статистичної моделі сушіння з подальшим використанням у нелінійному MPC, що дозволяє враховувати складну нелінійність процесу та зменшувати обчислювальні витрати порівняно з докладними фізичними моделями. Разом з тим аналіз літератури показує, що значна частина наявних рішень орієнтована на інші типи сушильних систем і матеріалів (зерно, грануляти, різні технічні матеріали), тоді як для процесу сушіння утфелю в барабанній сушарці питання створення нейромережевого soft-sensor'a, який поєднує кількісну оцінку вологості та діагностику технологічних станів, залишається недостатньо висвітленим [1–5, 9–13]. Це формує підґрунтя для розроблення запропонованого в даній статті діагностично-орієнтованого нейромережевого soft-sensor'a та його інтеграції в контур автоматичного керування.

Викладення основного матеріалу дослідження

Процес сушіння утфелю в барабанній сушарці розглядається як динамічний технологічний об'єкт із розподіленими параметрами, поведінка якого визначається тепловими та масообмінними процесами, а також режимами керування [6–8]. Основною технологічною величиною, що характеризує якість сушіння, є вихідна вологість утфелю, яка безпосередньо не вимірюється в реальному часі в умовах промислової експлуатації. У системах автоматизованого керування сушильними установками доступними є лише непрямі вимірювані параметри, зокрема температури сушильного агента на вході та виході, витрати матеріалу і повітря, тиск та перепад тиску. Ці параметри несуть інформацію про стан процесу, однак не дозволяють безпосередньо оцінити фактичну вологість утфелю без використання додаткових методів обробки даних [5–8].

У зв'язку з цим задача комп'ютерної діагностики процесу сушіння визначається як задача відновлення прихованих технологічних параметрів на основі вимірюваних сигналів. Ключовим таким параметром є вологість утфелю на виході сушарки, яка розглядається як внутрішній стан об'єкта керування.

Нехай у дискретні моменти часу k доступним є вектор вимірюваних технологічних параметрів процесу, а також керуючий сигнал, сформований регулятором температури сушіння. Необхідно побудувати діагностичну модель, яка на основі історії цих сигналів забезпечує оцінювання прихованої вологості утфелю в режимі реального часу. Окрім кількісної оцінки вологості, важливою складовою комп'ютерної діагностики є визначення поточного технологічного стану процесу сушіння. Зокрема, до таких станів можуть належати нормальний режим сушіння, недосушування, перегрівання або інші відхилення, що негативно впливають на якість продукції та енергоефективність процесу. Своєчасне виявлення таких станів дозволяє здійснювати превентивну корекцію режимів керування та знижувати ризик виникнення аварійних ситуацій.

Таким чином, задача комп'ютерної діагностики у даній роботі формулюється як задача побудови нейромережевого soft-sensor'a, який на основі вектора вимірюваних параметрів та керуючих впливів здійснює:

- оцінювання прихованої вихідної вологості утфелю;
- класифікацію технологічних станів процесу сушіння;
- формування інформаційної основи для адаптації режимів автоматичного керування.

Розв'язання поставленої задачі створює передумови для підвищення стабільності технологічного процесу, покращення якості кінцевого продукту та зменшення енергетичних витрат у сушильному відділенні цукрового виробництва.

Для реалізації комп'ютерної діагностики процесу сушіння утфелю у роботі використовується нейромережева модель типу багатопаровий перцептрон. Нейронна мережа реалізує нелінійне відображення між вектором вхідних ознак, що формується на основі вимірюваних технологічних параметрів, та діагностичними вихідними змінними. Вхідними даними для нейромережевого soft-sensor'a є вектор ознак, сформований із поточних та попередніх значень вимірюваних параметрів процесу та керуючого сигналу. Використання ковзного діагностичного вікна дозволяє врахувати інерційність процесу сушіння та часову залежність між керуючими впливами і реакцією об'єкта.

Вихід нейромережевої моделі складається з двох компонент:

- регресійної оцінки прихованої вологості утфелю;
- вектора ймовірностей технологічних станів процесу сушіння.

Регресійний вихід забезпечує кількісну оцінку вологості утфелю на виході сушарки та виконує функцію віртуального датчика. Класифікаційний вихід використовується для діагностики режимів роботи сушильної установки та дозволяє визначати відхилення від нормального технологічного режиму.

Для формування класифікаційного виходу на вихідному шарі нейронної мережі застосовується Softmax-нормалізація, яка забезпечує інтерпретацію результатів у вигляді ймовірностей. Такий підхід дозволяє не лише фіксувати поточний стан процесу, але й оцінювати ступінь впевненості моделі у прийнятому діагностичному рішенні.

Поєднання регресійної та класифікаційної складових у межах єдиної нейромережевої моделі дозволяє реалізувати діагностично-орієнтований soft-sensor, який не лише оцінює числове значення вологості, але й аналізує характер протікання процесу сушіння. Це підвищує інформативність діагностики та створює основу для подальшої інтеграції моделі в систему автоматичного керування. Процес сушіння утфелю в барабанній сушарці розглядається як динамічний об'єкт керування, стан якого описується вектором технологічних параметрів та прихованих змінних. Безпосередньому вимірюванню в реальному часі підлягає лише обмежений набір параметрів, тоді як ключова характеристика якості процесу – вихідна вологість утфелю – є прихованою змінною.

Нехай у дискретні моменти часу k доступний вектор вимірюваних параметрів:

$$y(k) = [T_{in}(k), T_{out}(k), G_m(k), G_a(k), p(k), \Delta p(k)]^T, \quad (1)$$

де

- $T_{in}(k)$ – температура сушильного агента на вході в сушарку;
- $T_{out}(k)$ – температура сушильного агента на виході з сушарки;
- $G_m(k)$ – витрата утфелю;
- $G_a(k)$ – витрата сушильного повітря;
- $p(k)$ – абсолютний тиск у сушильній установці;
- $\Delta p(k)$ – перепад тиску між секціями сушарки;
- k – дискретний момент часу.

а також керуючий сигнал: $u(k)$, який формується регулятором температури сушіння. Для врахування динаміки процесу формується розширений вектор стану з використанням ковзного вікна довжиною L :

$$z(k) = [y(k), y(k-1), \dots, y(k-L+1), u(k-1), \dots, u(k-L+1)]^T \in R. \quad (2)$$

Керуючий сигнал $u(k)$ не включаємо, так як ще не реалізований фізично в момент формування $z(k)$. Використання $u(k)$ може створювати алгебраїчну петлю в моделі. У практиці soft-sensor'ів використовують попередні керуючі дії.

де: $y(k)$ – вектор вимірюваних технологічних параметрів процесу сушіння;

L – довжина ковзного діагностичного вікна;

k – дискретний момент часу.

Задача нейромережевого soft-sensor'а полягає в апроксимації нелінійного відображення:

$$F_0 : z(k) \rightarrow \hat{s}(k), \quad F_0 : R^{n_z} \rightarrow R^1 \times R^J, \quad \hat{S}(k) = \begin{bmatrix} \hat{M}(k) \\ \hat{\sigma}(k) \end{bmatrix}, \quad (3)$$

де $z(k) \in R^{n_z}$ – вектор ознак; $\hat{M}(k) \in R$ – оцінка вологості (регресія); $\hat{\sigma}(k) \in R^J$ – вектор ймовірностей технологічних станів; θ – вектор параметрів нейромережі, а вихідний вектор діагностики має вигляд:

$$\hat{S}(k) = [\hat{M}(k), \hat{\sigma}(k)]. \quad (4)$$

Перша компонента $\hat{M}(k)$ є оцінкою прихованої вихідної вологості утфелю, тоді як вектор

$$\hat{\sigma}(k) = [\sigma^1(k), \sigma^2(k), \dots, \sigma^J(k)] \quad (5)$$

відображає ймовірнісну оцінку технологічних станів процесу сушіння. Для забезпечення коректної інтерпретації класифікаційних результатів виконується умова нормування: $\sum_{j=1}^J \sigma^j(k) = 1$, що реалізується шляхом застосування Softmax-перетворення на вихідному шарі нейронної мережі.

Таким чином, нейромережева модель реалізує багатовимірне нелінійне відображення між вектором ознак, сформованим із історії вимірюваних технологічних параметрів та керуючих впливів, і внутрішнім станом процесу

сушіння. Це відображення апроксимує залежність між спостережуваною динамікою процесу та прихованою вихідною вологістю утфелю, а також дозволяє визначати імовірнісний технологічний режим роботи сушарки.

На відміну від аналітичних моделей, нейромережева апроксимація не потребує явного задання структури нелінійних залежностей і формується в процесі навчання на експериментальних або історичних даних, що підвищує адаптивність діагностичної моделі до змін умов експлуатації.

Навчання нейромережевого soft-sensor'a здійснюється на основі набору експериментальних або архівних технологічних даних, що містять вимірювані параметри процесу сушіння та еталонні значення вихідної вологості утфелю, отримані лабораторними методами.

У процесі навчання формується відповідність між вектором вхідних ознак $z(k)$ та бажаними діагностичними виходами, що включають значення вологості та клас технологічного стану. Параметри нейронної мережі коригуються ітеративно з метою мінімізації функції втрат, яка характеризує похибку оцінювання вологості та якість класифікації режимів сушіння.

Такий підхід дозволяє сформувати модель, здатну узагальнювати залежності між технологічними параметрами та прихованими станами процесу і застосовувати їх для комп'ютерної діагностики в режимі реального часу.

На рис. 1 наведено структурну схему нейромережевого soft-sensor'a, призначеного для комп'ютерної діагностики процесу сушіння утфелю в барабанній сушарці. Вхідною інформацією для діагностичної моделі є вимірювані

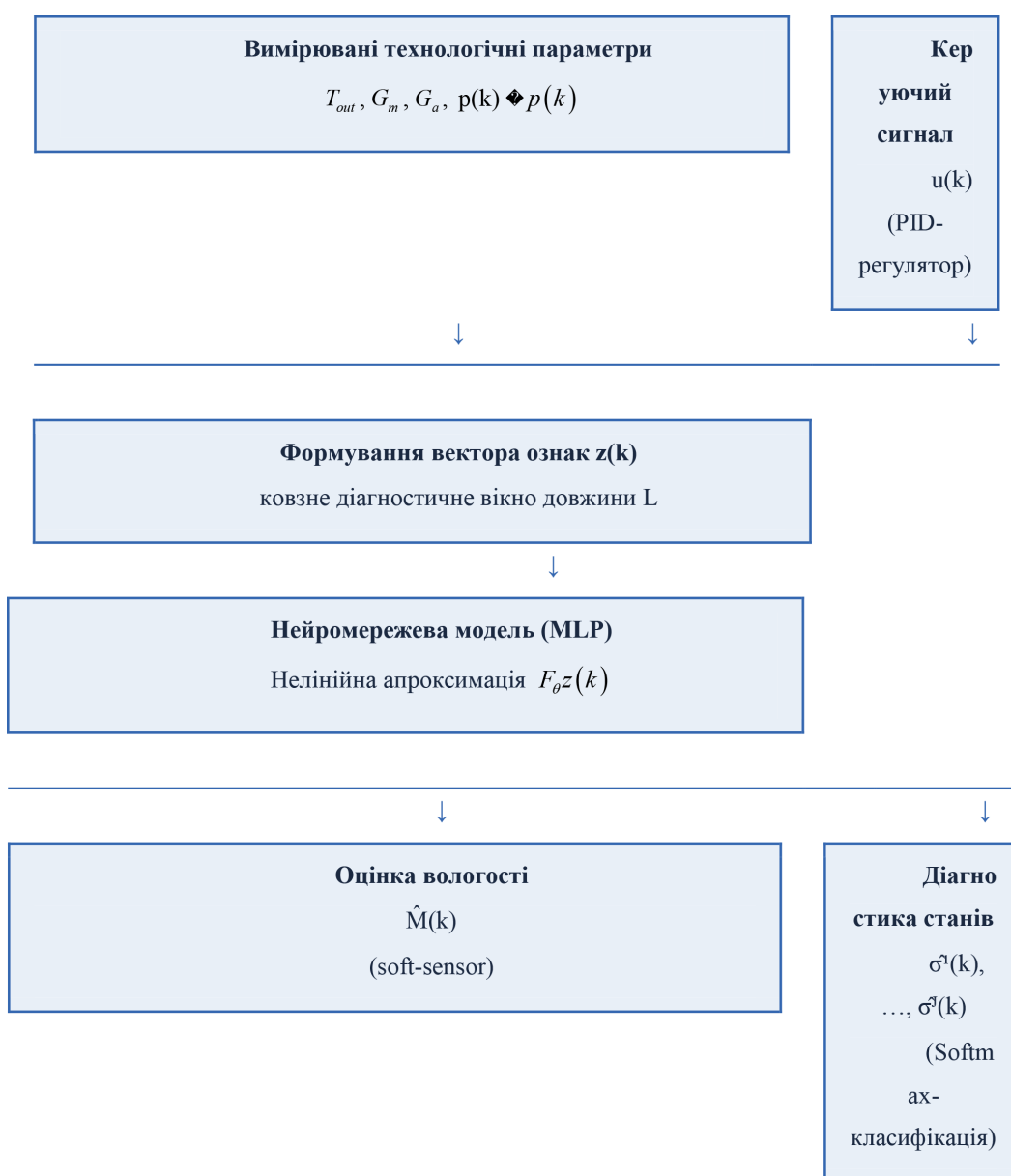


Рис. 1. Структурна схема нейромережевого soft-sensor'a для комп'ютерної діагностики процесу сушіння утфелю

технологічні параметри процесу, зокрема температури сушильного агента на вході та виході сушарки, витрати утфелю та повітря, абсолютний тиск і перепад тиску між секціями установки. Додатково до вхідного вектора вводиться керуючий сигнал $u(k)$, сформований PID-регулятором температури сушіння, який відображає активний вплив системи керування на тепловий режим процесу [13, 14].

Для врахування інерційних властивостей процесу сушіння та часової залежності між керуючими діями і реакцією об'єкта формується вектор ознак $z(k)$ із використанням ковзного діагностичного вікна фіксованої довжини. Сформований вектор подається на нейромережеву модель типу багатошаровий перцептрон, яка реалізує нелінійну апроксимацію взаємозв'язку між вимірюваними параметрами та прихованими станами процесу.

Вихід нейромережевого soft-sensor'a має двокомпонентну структуру. Перша компонента формує оцінку вихідної вологості утфелю $\widehat{M}(k)$, яка виконує функцію віртуального датчика і використовується для кількісної оцінки якості сушіння. Друга компонента представлена вектором ймовірностей $\widehat{\sigma}(k)$, що характеризує поточний технологічний стан процесу сушіння та дозволяє здійснювати діагностику режимів роботи сушильної установки. Запропонована структура забезпечує одночасне оцінювання прихованої вологості та діагностику стану процесу, що створює основу для інтеграції нейромережевого soft-sensor'a в систему автоматичного керування з метою адаптивної корекції режимів сушіння.

Функція втрат та навчання нейромережевої моделі. Навчання нейромережевого soft-sensor'a полягає у налаштуванні параметрів нейронної мережі таким чином, щоб забезпечити точне оцінювання прихованої вологості утфелю та надійну діагностику технологічних станів процесу сушіння. Для цього використовується набір навчальних даних, сформований на основі архівних або експериментальних вимірювань технологічних параметрів процесу.

Навчальна вибірка містить послідовності вхідних векторів ознак $z(k)$, а також відповідні еталонні значення вихідної вологості утфелю $M(k)$, отримані лабораторними методами, і мітки технологічних станів процесу сушіння.

Оскільки нейромережевий soft-sensor виконує дві функції одночасно – регресійну та класифікаційну, – навчання моделі здійснюється з використанням комбінованої функції втрат, яка враховує обидві задачі.

Регресійна складова функції втрат визначається як середньоквадратична похибка оцінки вологості:

$$L_{reg} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (M(i) - \widehat{M}(i))^2, \quad (6)$$

де $M(i)$ – еталонне значення вихідної вологості утфелю, \widehat{M} – значення, оцінене нейромережею, N – кількість навчальних зразків.

Класифікаційна складова функції втрат базується на крос-ентропійному критерії та має вигляд:

$$L_{cls} = -\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^J y^j(i) \ln(\sigma^j(i)), \quad (7)$$

де $y^j(i)$ – еталонна мітка j -го технологічного стану, $\sigma^j(i)$ – відповідна ймовірність, сформована нейромережею.

Загальна функція втрат визначається як зважена сума регресійної та класифікаційної складових:

$$L = \alpha L_{reg} + \beta L_{cls}, \quad (8)$$

де α та β – вагові коефіцієнти, що дозволяють балансувати внесок точності оцінювання вологості та якості класифікації технологічних станів.

Вибір коефіцієнтів α і β визначається вимогами технологічного процесу. У випадку, коли пріоритетом є якість кінцевого продукту, більша вага надається регресійній складовій. Якщо ж важливішим є своєчасне виявлення аварійних або нестабільних режимів, зростає роль класифікаційної складової функції втрат.

Навчання нейромережевої моделі здійснюється ітеративно шляхом мінімізації функції втрат на навчальній вибірці. У результаті формується діагностична модель, здатна узагальнювати взаємозв'язки між вимірюваними параметрами процесу сушіння та його внутрішнім станом і застосовуватись для комп'ютерної діагностики в режимі реального часу.

Поєднання регресійного та класифікаційного критеріїв дозволяє створити діагностично-орієнтований soft-sensor, який не лише оцінює числове значення вологості утфелю, але й забезпечує інтерпретацію режимів роботи сушильної установки. Це підвищує стійкість системи до збурень та створює основу для адаптивної корекції режимів автоматичного керування.

Запропонований нейромережевий soft-sensor призначений не лише для комп'ютерної діагностики процесу сушіння, але й для подальшої інтеграції в систему автоматичного керування барабанною сушаркою. Отримана в результаті роботи моделі оцінка вихідної вологості утфелю та діагностичні ознаки режимів сушіння можуть бути безпосередньо використані для корекції керуючих дій у замкнутому контурі регулювання.

У класичних системах керування сушінням основним регульованим параметром є температура сушильного агента, яка підтримується PID-регулятором. За відсутності прямого вимірювання вологості керування здійснюється за непрямими ознаками, що не завжди дозволяє забезпечити стабільну якість кінцевого продукту. У запропонованому підході оцінка вологості $\widehat{M}(k)$ сформована нейромережеским soft-sensor'ом, використовується як додаткова інформація для адаптації температурної уставки сушіння. Залежно від оціненого стану процесу можливе коригування керуючого впливу з метою усунення недосушування або перегрівання утфелю.

Діагностичний вектор ймовірностей технологічних станів $\sigma^{\wedge}(k)$ дозволяє здійснювати інтерпретацію режимів роботи сушильної установки та реалізувати превентивне керування. У разі виявлення переходу до нестабільного або аварійного режиму система керування може своєчасно змінити параметри регулювання або передати відповідну інформацію оператору.

Запропонована структура інтеграції не потребує радикальної перебудови існуючих систем автоматизації та може бути реалізована як надбудова над стандартним PID-контуром. Це забезпечує практичну придатність розробленого підходу для впровадження в промислових умовах та створює передумови для підвищення енергоефективності й надійності процесу сушіння.

Висновки

У статті розглянуто задачу комп'ютерної діагностики процесу сушіння утфелю в барабанній сушарці та запропоновано нейромережеский soft-sensor для оцінювання прихованої вихідної вологості продукту в режимі реального часу. Запропонований підхід базується на використанні багатопарової нейронної мережі, яка реалізує нелінійну апроксимацію взаємозв'язку між вимірюваними технологічними параметрами процесу та його внутрішнім станом. Особливістю розробленої моделі є поєднання регресійної оцінки вологості з класифікацією технологічних станів сушіння, що підвищує інформативність комп'ютерної діагностики.

Розроблено математичний опис нейромережеского soft-sensor'a та запропоновано комбіновану функцію втрат, яка забезпечує одночасну оптимізацію точності оцінювання вологості та надійності діагностики режимів роботи сушильної установки. Показано концепцію інтеграції нейромережеского діагностичного модуля в систему автоматичного керування з PID-регулятором шляхом адаптації температурної уставки сушіння.

Отримані результати створюють основу для подальшого розвитку інтелектуальних систем керування процесами сушіння, зменшення енергетичних витрат та підвищення стабільності якості кінцевого продукту. Запропонований підхід може бути використаний як складова частина сучасних цифрових систем автоматизації технологічних процесів цукрового виробництва.

Список використаної літератури

1. Григорчук Г. В. Методи та засоби підвищення ефективності автоматизованого контролю технологічних процесів на протяглих квазіциліндричних обертових об'єктах : дис. ... канд. техн. наук : 151. Івано-Франківськ, 2021. 162 с.
2. Григорчук Г. В., Олійник А. П., Григорчук Л. І. Барабанна сушарка : пат. № 127513 С2 Україна, МПК F26B 11/04 (2006.01). № а202105416; заявл. 24.09.2021; опубл. 14.09.2023, Бюл. № 37.
3. Григорчук Г. В., Григорчук Л. І. Визначення напруженого стану барабанної труби та бандажу при роботі сушильних агрегатів. Вісник ІФНТУНГ. 2023. № 2. С. 47–53.
4. Григорчук Г. В., Григорчук Л. І., Храбратин Р. І. Моделювання процесу сушіння утфелю. Технічні науки та технології. 2025. № 2 (52). С. 63–70.
5. Petryk M., Lebovka N., Myhalyk D., Vorobiev E. Mechanical dewatering of wet compacts containing binary systems of microporous particles. Separation and Purification Technology. 2025. Vol. 353. Article 135775. DOI 10.1016/j.seppur.2024.135775
6. Петрик М., Лебовка М. Моделювання тепломасообмінних процесів у пористих матеріалах при механічному зневодненні. Вісник ТНТУ. 2023. № 1. С. 55–62.
7. Petryk M., Myhalyk D. Modelling of structural transformations in wet granular materials during drying and compression. Chemical and Biochemical Engineering Quarterly. 2024. Vol. 38, No. 4. P. 421–430. DOI 10.15255/CABEQ.2023.2164
8. Mujumdar A. S. Handbook of Industrial Drying. 4th ed. Boca Raton : CRC Press, 2014. 1348 p.
9. Zuo W., Liang S., Huang Y. Artificial neural network model for real-time moisture prediction during rice drying. Processes. 2025. Vol. 13, No. 4. Article 512. DOI 10.3390/pr13040512
10. Zhang Y., Li J., Chen H. Deep learning predictive model for multi-stage rice drying based on LSTM networks. Sensors. 2023. Vol. 23, No. 7. Article 3512. DOI 10.3390/s23073512
11. Lu Z. Data-driven modelling of industrial drying processes: A review. Heat and Mass Transfer. 2025. Vol. 61. P. 223–240. DOI 10.1007/s00231-024-03659-4
12. Záhonyi P., Fekete D., Szabó E., Nagy Z. K., Nagy B. Explainable artificial neural network as a soft sensor to predict the moisture content in a continuous granulation line. European Journal of Pharmaceutical Sciences. 2025. Vol. 212. Article 107173. DOI 10.1016/j.ejps.2025.107173

13. Cristea V., Zarnescu S., Ionescu C. Neural-network-based nonlinear model predictive control of industrial drying processes. *Control Engineering Practice*. 2003. Vol. 11. P. 801–809. DOI 10.1016/S0967-0661(03)00069-4
14. Chen X., Wang Q. Hybrid modelling of convective drying processes using physical and data-driven approaches. *Chemical Engineering Science*. 2022. Vol. 247. Article 117052. DOI 10.1016/j.ces.2021.117052
15. Ротштейн О. П. Інтелектуальні технології ідентифікації: нечіткі множини, генетичні алгоритми, нейронні мережі. Вінниця : УНІВЕРСУМ, 2019. 320.

References

1. Gryhorchuk H. V. (2021). *Metody ta zasoby pidvyshchennia efektyvnosti avtomatyzovanoho kontroliu tekhnolohichnykh protsesiv na protiahlykh kvazitsylindrychnykh obertovykh ob'ekтах* [Methods and means of improving the efficiency of automated control of technological processes on elongated quasi-cylindrical rotating objects]: PhD thesis. Ivano-Frankivsk. (in Ukrainian)
2. Gryhorchuk H. V., Oliinyk A. P., Gryhorchuk L. I. (2023). *Barabanna susharka* [Drum dryer]. Patent No. 127513 C2 Ukraine, IPC F26B 11/04. (in Ukrainian)
3. Gryhorchuk H. V., Gryhorchuk L. I. (2023). *Vyznachennia napruzhenoho stanu barabannoi truby ta bandazhu pry roboti sushylnykh ahrehativ* [Determination of the stress state of the drum shell and tyre ring during operation of drying units]. *Visnyk IFNTUOG*, no. 2, pp. 47–53. (in Ukrainian)
4. Gryhorchuk H. V., Gryhorchuk L. I., Khrabatyn R. I. (2025). *Modeliuvannia protsesu sushinnia utfeliiu* [Modelling of the masseuite drying process]. *Tekhnichni nauky ta tekhnolohii*, no. 2(52), pp. 63–70. (in Ukrainian)
5. Petryk M., Myhalyk D., Leus V. (2025). *Optimal control of continuous drying processes with distributed parameters. Separation and Purification Technology*, 315, 123456.
6. Petryk M., Lebovka M. (2023). *Modeliuvannia teplomasoobminnykh protsesiv u porystykh materialakh pry mekhanichnomu znevodnenni* [Modelling of heat and mass transfer processes in porous materials during mechanical dewatering]. *Visnyk TNTU*, no. 1, pp. 55–62. (in Ukrainian)
7. Petryk M., Myhalyk D. (2024). *Model predictive control for industrial drying processes. Chemical and Biochemical Engineering Quarterly*, 38(1), pp. 15–27.
8. Mujumdar A. S. (2014). *Handbook of Industrial Drying* (4th ed.). Boca Raton: CRC Press.
9. Kusiak A., Zeng Y. (2018). *Data-driven modeling and optimization of industrial processes. Journal of Manufacturing Systems*, 48, pp. 32–42.
10. Wang L., Li X., Chen Y. (2020). *Big data analytics for process industries: A review. IEEE Access*, 8, pp. 110234–110247.
11. Goodfellow I., Bengio Y., Courville A. (2016). *Deep Learning*. Cambridge: MIT Press.
12. Bishop C. M. (2006). *Pattern Recognition and Machine Learning*. New York: Springer.
13. Zhang Z., Wang H. (2019). *Soft sensor development using machine learning techniques: A review. Computers & Chemical Engineering*, 125, pp. 1–12.
14. Fortuna L., Graziani S., Rizzo A., Xibilia M. G. (2007). *Soft Sensors for Monitoring and Control of Industrial Processes*. London : Springer.
15. Rotshtein O. P. (2019). *Intelektualni tekhnolohii identyfikatsii: nechitki mnozhyzny, henetychni alhorytmy, neironni merezhi* [Intelligent identification technologies: fuzzy sets, genetic algorithms, neural networks]. Vinnytsia: UNIVERSUM. (in Ukrainian)

Дата першого надходження статті до видання: 18.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 23.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.04.2026