

УДК 519.7: 664.72

О.В. ПОЛИВОДА  
Херсонський національний технічний університет  
В.В. ПОЛИВОДА  
Херсонська державна морська академія  
Д.Г. ЛИТВИНЧУК  
Херсонський національний технічний університет

### МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ОЦІНКИ ВОЛОГОСТІ ЗЕРНА У БОРОШНОМЕЛЬНОМУ ВИРОБНИЦТВІ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ

*Досліджені методи й засоби контролю вологості зерна в потоці та розроблений спосіб одержання й обробки первинної інформації в процесі зволоження зерна перед розмелом з використанням інтелектуального датчика вологості, побудованого на алгоритмах штучних нейронних мереж. Виконана математична постановка задачі автоматизації контролю вологості зерна. Сформульовані основні етапи розв'язання поставленої задачі. Проведений аналіз і обрані значущі інформаційні параметри, що впливають на вологість зерна. Обрана структура нейронної мережі. Розроблений алгоритм навчання нейронної мережі за допомогою процедури зворотного розповсюдження.*

*Ключові слова: нейронна мережа, зерно, контроль вологості, алгоритм навчання.*

О.В. ПОЛИВОДА  
Херсонский национальный технический университет  
В.В. ПОЛИВОДА  
Херсонская государственная морская академия  
Д.Г. ЛИТВИНЧУК  
Херсонский национальный технический университет

### МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ ВЛАЖНОСТИ ЗЕРНА В МУКОМОЛЬНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

*Исследованы методы и средства контроля влажности зерна в потоке и разработан способ получения и обработки первичной информации в процессе увлажнения зерна перед размолотом с использованием интеллектуального датчика влажности, построенного на алгоритмах искусственных нейронных сетей. Выполнена математическая постановка задачи автоматизации контроля влажности зерна. Сформулированы основные этапы решения поставленной задачи. Проведен анализ и выбраны значимые информационные параметры, влияющие на влажность зерна. Выбрана структура нейронной сети. Разработан алгоритм обучения нейронной сети с помощью процедуры обратного распространения.*

*Ключевые слова: нейронная сеть, зерно, контроль влажности, алгоритм обучения.*

O.V. POLYVODA  
Kherson National Technical University  
V.V. POLYVODA  
Kherson State Maritime Academy  
D.G. LYTVYNCHUK  
Kherson National Technical University

### MATHEMATICAL MODEL OF EVALUATING THE MOISTURE OF GRAIN IN FLOUR-MILLING PRODUCTION WITH THE APPLICATION OF NEURAL NETWORKS

*The methods and means for controlling grain moisture in the flow are studied and a method for obtaining and processing primary information in the process of moistening grain before milling is developed using an intelligent moisture sensor built on algorithms of artificial neural networks. A mathematical statement of the problem of automation of grain moisture control was performed. The main stages of the solution of the problem are formulated. The analysis and selection of significant information parameters affecting the moisture content of the grain was made. The structure of the neural network is chosen. An algorithm for training a neural network using a back propagation procedure is developed.*

*Key words: neural network, grain, moisture control, learning algorithm.*

### Постановка проблеми

Вологість зерна є одним із визначальних параметрів на всіх стадіях його зберігання та переробки. При сортовому помелі в процесі гідротермічної обробки зерну надають оптимальну вологість, величина якої залежно від певних показників зерна коливається від 14,5% до 16,5% і зумовлює найкращі результати його переробки, рентабельність роботи млина й конкурентоспроможність борошна з погляду стабільності її хлібопекарських достоїнств [1]. Існуючі методи оперативного й своєчасного вимірювання вологості зерна в потоці є або занадто дорогими, або важко реалізованими у виробничих умовах. Тому виникає необхідність в розробці інтелектуального віртуального датчика, здатного прогнозувати вологість зерна в потоці, використовуючи значення інших параметрів технологічного процесу.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

На сучасному етапі розвитку систем керування у борошномельному виробництві триває створення точного приладу, який зможе вимірювати вологість зерна. Існує велика кількість експрес-аналізаторів вологості зерна, що засновані на зміні фізичних характеристик зерна при зміні його вологості (електропровідність, діелектрична проникність, поглинання та відбиття інфрачервоного випромінювання та ін.) [2], але їх неможливо використовувати в автоматизованих системах керування для вимірювання вологості зерна в потоці. Більш точними на сьогодні вважаються такі методи як вимірювання властивостей зерна в електромагнітних полях високої й надвисокої частоти, але з часом вони втрачають свою точність через ряд неконтрольованих факторів: зміну геометричних розмірів усіх компонентів датчика зі зміною його температури, деформацію компонентів чутливих елементів, зношування їх поверхонь, деградацію властивостей використовуваних матеріалів, абсорбування вологи в їхні мікропори й мікротріщини і т.д. [3].

Визначити вологість зерна можливо не тільки за допомогою датчиків, а й за допомогою математичних моделей, отриманих із використанням методів ідентифікації [4], наприклад, рівнянь регресії. Однак, отримана математична модель буде придатна для використання на конкретному устаткуванні у досить вузькому діапазоні початкових умов. У реальній же ситуації технологічний процес являє собою складну систему взаємодіючих між собою факторів, кореляцію між якими найчастіше не можна виразити в математичному еквіваленті, забезпечивши при цьому необхідну точність отриманих результатів.

Іншим рішенням може бути побудова віртуального датчика на основі штучної нейронної мережі (НМ). Такий спосіб рішення буде полягати в створенні й навчанні нейронної мережі, яка зможе прораховувати шукану величину по непрямим параметрах технологічного процесу (ТП).

### Мета дослідження

Метою дослідження є розробка інтелектуального датчика вологості для вимірювання вологості зерна в потоці на борошномельному виробництві з використанням штучної нейронної мережі, який забезпечує необхідну точність вимірювань, швидкодію, відносну простоту реалізації, незалежність вимірювань від фізичних властивостей компонентів датчика та може бути інтегрований в існуючі комп'ютеризовані системи управління ТП.

### Викладення основного матеріалу дослідження

Розв'язання задачі побудови й інтеграції інтелектуального датчика на основі нейромережових технологій (НМТ) у комп'ютеризовані системи управління в загальному випадку складається з наступних етапів, представлених на рис. 1.



Рис. 1. Етапи побудови й інтеграції віртуального датчика на основі НМТ в АСУ ТП

Для формування вхідного шару нейронної мережі та визначення параметрів навчальної вибірки проаналізовано всі параметри технологічного процесу виробництва борошна, отримані за допомогою контрольно-вимірювальних приладів, параметри, що визначаються конфігурацією обладнання, параметри, що задаються регламентами різних режимів ТП, а також параметри сировини, одержувані у процесі вхідного контролю за допомогою лабораторних вимірювань (табл. 1).

В процесі вибору типу НМ були проаналізовані одношарові та багатшарові структури [5–6]. Аналіз одношарових НМ показав їх непридатність для розв'язку поставленого завдання через низьку обчислювальну здатність, а застосування багатшарових НМ прямого поширення типу багатшаровий перцептрон забезпечує високу точність прогнозування вологості зерна в потоці.

Таблиця 1

Значущі параметри протікання технологічного процесу виробництва борошна

Операція	Устаткування	Параметр контролю	Тип вимірювань
Зберігання зерна	Силоси	Температура зерна ( $x_1$ )	Контрольно-вимірювальні прилади
		Температура повітря ( $x_2$ )	Контрольно-вимірювальні прилади
		Відносна вологість повітря ( $x_3$ )	Контрольно-вимірювальні прилади
		Температура вентиляції ( $x_4$ )	Контрольно-вимірювальні прилади
		Витрата повітря ( $x_5$ )	Контрольно-вимірювальні прилади
Вхідний контроль якості зерна	Устаткування лабораторних досліджень	Натура ( $x_6$ )	Лабораторні вимірювання
		Скловидність ( $x_7$ )	Лабораторні вимірювання
		Кількість білка, крохмалю, натура ( $x_8$ )	Лабораторні вимірювання
		Вміст мінеральної домішки ( $x_9$ )	Лабораторні вимірювання
		Клейковина ( $x_{10}$ )	Лабораторні вимірювання
		Білизна ( $x_{11}$ )	Лабораторні вимірювання
		Кислотність ( $x_{12}$ )	Лабораторні вимірювання
		Зольність ( $x_{13}$ )	Лабораторні вимірювання
		Крупність ( $x_{14}$ )	Лабораторні вимірювання
		Засміченість ( $x_{15}$ )	Лабораторні вимірювання
		Температура зберігання ( $x_{16}$ )	Лабораторні вимірювання
		Вологість зберігання ( $x_{17}$ )	Лабораторні вимірювання
		Зерноочистка	Зерноочистно-сушильні комплекси
Частота коливань сит ( $x_{19}$ )	Параметр конфігурації обладнання		
Витрата зерна ( $x_{20}$ )	Контрольно-вимірювальні прилади		
Швидкість повітряного потоку ( $x_{21}$ )	Параметр техпроцесу		
Вологість повітря ( $x_{22}$ )	Контрольно-вимірювальні прилади		
Вологість зерна ( $x_{23}$ )	Контрольно-вимірювальні прилади		
Діаметр отворів сит ( $x_{24}$ )	Параметр конфігурації обладнання		
Амплітуда коливань сит ( $x_{25}$ )	Параметр техпроцесу		
Зволоження зерна	Шнековий зволожувач Дозатор води	Величина швидкості обертання шнека ( $x_{26}$ )	Параметр техпроцесу
		Температура зерна ( $x_{27}$ )	Контрольно-вимірювальні прилади
		Тиск води ( $x_{28}$ )	Контрольно-вимірювальні прилади
		Витрата води ( $x_{29}$ )	Контрольно-вимірювальні прилади
		Температура води ( $x_{30}$ )	Контрольно-вимірювальні прилади

Задача автоматизації контролю вологості зерна  $W$  в потоці з використанням НМ-моделі формулюється в такий спосіб:

$$W = F(\bar{X}_d, \bar{X}_l, \bar{X}_s, \bar{X}_m), \tag{1}$$

де  $\bar{X}_d$  – вхідний вектор, що характеризує параметри технологічного процесу, отримані за допомогою контрольно-вимірювальних приладів;  $\bar{X}_l$  – вхідний вектор, що характеризує вхідні показники якості сировини, визначені у результаті лабораторних вимірювань;  $\bar{X}_s$  – вхідний вектор, що характеризує параметри конфігурації технологічного обладнання;  $\bar{X}_m$  – вхідний вектор, що визначається режимами ТП.

Для НМ вихідний сигнал  $i$ -ого нейрона схованого шару  $v_i$  в загальному виді буде мати вигляд:

$$v_i = f \left( \sum_{j=0}^N w_{ij}^{(1)} x_j \right), \quad (2)$$

де  $w_{ij}^{(1)}$  – значення вагових параметрів вхідних сигналів схованого шару НМ;  $j = \overline{1, N}$ ,  $N$  – кількість значущих параметрів вхідного шару;  $i = \overline{1, K}$ ,  $K$  – кількість нейронів схованого шару.

Тоді для вихідного шару, де формується значення вологості зерна, буде справедливо наступне рівняння:

$$y = f \left( \sum_{i=0}^K w_{ij}^{(2)} v_i \right) = f \left( \sum_{i=0}^K w_{ij}^{(2)} f \left( \sum_{j=0}^N w_{ij}^{(1)} x_j \right) \right). \quad (3)$$

З рівняння (3) видно, що на значення вихідного сигналу впливають ваги обох шарів, тоді як сигнали, вироблювані в схованому шарі, не залежать від ваг вихідного шару.

В якості функції активації нейронів для даної мережі була обрана сигмоїдальна функція:

$$f(z) = \frac{1}{1 + \exp(-z)}, \quad (4)$$

тоді рівняння (2) прийме наступний кінцевий вид:

$$v_i = \frac{1}{1 + \exp \left( - \sum_{j=0}^N w_{ij}^{(1)} x_j \right)}, \quad (5)$$

а значення вологості зерна буде виражено кінцевою формулою:

$$W = \frac{1}{1 + \exp \left( - \sum_{i=0}^K w_{1i}^{(2)} v_i \right)} = \frac{1}{1 + \exp \left( - \sum_{i=0}^K w_{1i}^{(2)} \left( \frac{1}{1 + \exp \left( - \sum_{j=0}^N w_{ij}^{(1)} x_j \right)} \right) \right)}. \quad (6)$$

На рис. 2 представлена структура розробленої нейронної мережі, типу багатошаровий перцептрон з одним схованим шаром. Вхідний вектор мережі складається з елементів табл. 1. На виході НМ формує вихідний сигнал вологості зерна  $W$ .

Наступний етап розробки НМ полягає в побудові алгоритму навчання НМ за допомогою процедури зворотного поширення та складається за наступних кроків:

1. Подається на вхід мережі один з можливих тестових наборів параметрів і в режимі звичайного функціонування НМ, коли сигнали поширюються від входів до виходів, розраховуються вихідні значення.
2. Обчислюється похибка  $\delta_j^{(N)}$  для вихідного шару й значення зміни вагових параметрів шару  $\Delta w_{ij}^{(N)}$  та всіх інших  $n$  шарів,  $n = \overline{N-1, 1}$ .
3. Скорегувати всі ваги в НМ

$$w_{ij}^{(n)} = w_{ij}^{(n)} + \Delta w_{ij}^{(n)}. \quad (7)$$

4. Якщо помилка мережі істотна, повернутися до кроку 1, а якщо ні, то, мережу можна вважати навченою.

В результаті перевірки адекватності НМ-моделі було з'ясовано, що максимальна помилка навчання не перевищила 0,5%, тобто укладається в межі припустимої похибки.

Розроблений інтелектуальний датчик вологості зерна може бути інтегрований у комп'ютеризовані системи управління на борошномельному виробництві з використанням сучасного програмного й апаратного забезпечення.

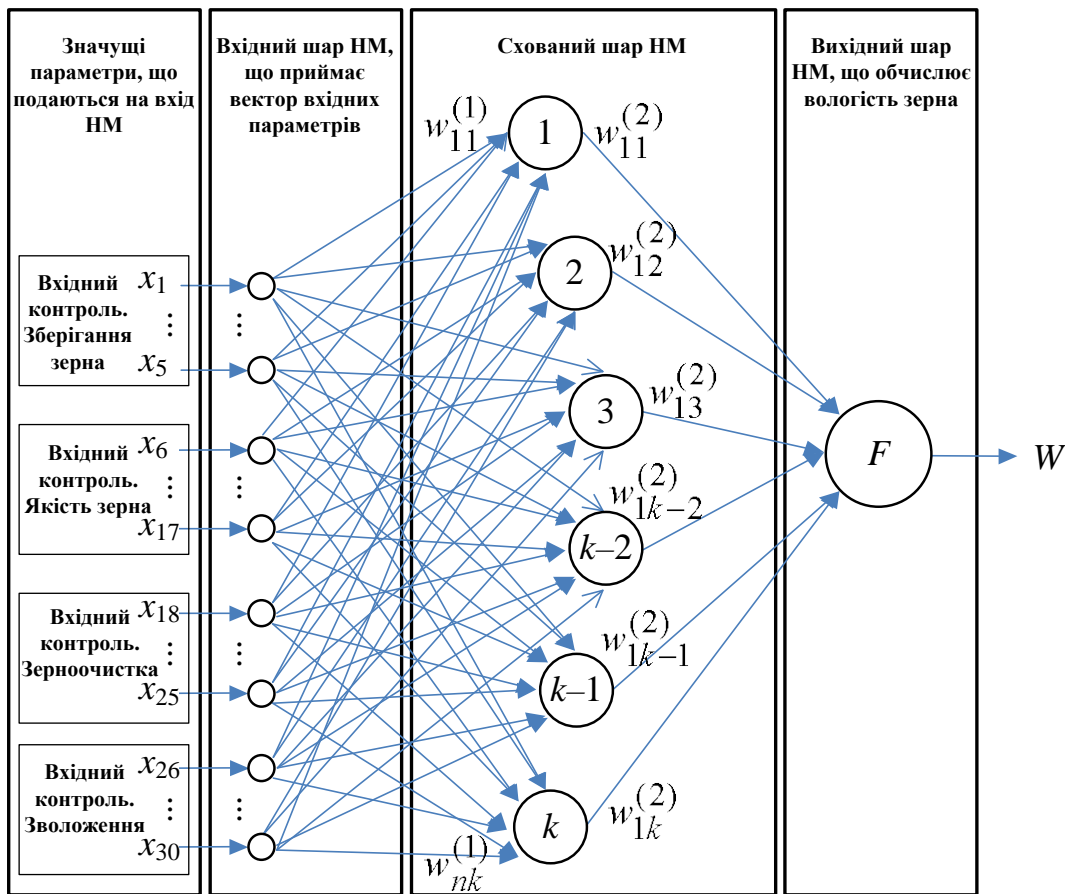


Рис. 2. Структура НМ типу багатошаровий перцептрон з одним схованим шаром для визначення вологості зерна

#### Висновки

Розроблено метод автоматичного контролю вологості зерна в потоці, заснований на впровадженні в АСУ ТП інтелектуального датчика, побудованого на алгоритмах штучних НМ. Впровадження системи регулювання вологості зерна з інтегрованим у неї інтелектуальним датчиком дозволить підвищити якість борошна, збільшити продуктивність і надійність функціонування виробничого встаткування, забезпечити безпечні умови праці.

#### Список використаної літератури

1. Хосни Р.К. Зерно и зернопереработка / Р.К. Хосни; пер. с англ. под общ. ред. Н.П. Черняева. – СПб: Профессия, 2006. – 336 с.
2. Кричевский Е.С. Контроль влажности твердых и сыпучих материалов / Е.С. Кричевский, А.Г. Волченко, С.С. Галушкин; Под ред. Е.С. Кричевского. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 136 с.
3. Бензарь В.К. Техника СВЧ-влажнометрии / В.К. Бензарь. – Минск: Высшая школа, 1974. – 352 с.
4. Киричков В.Н. Автоматика и управление в технических системах. В 11-ти кн. Кн.2. Идентификация объектов систем управления технологическими процессами / В.Н. Киричков; под ред. А.А. Краснопрошиной. – К.: Выща шк., 1990. – 263 с.
5. Галушкин А.И. Теория нейронных сетей. Книга 1. / А.И. Галушкин – М.: ИПРЖР, 2000. – 147 с.
6. Савостин С.Д. Автоматизация контроля показателей качества муки в процессе размола с использованием интеллектуальных технологий: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.06 / Савостин Сергей Дмитриевич. – Москва, 2014. – 210 с.