

**Ляшенко Сергій Олексійович**,  
доктор технічних наук, професор, професор  
кафедри мехатроніки, безпеки  
життєдіяльності та управління якістю  
Державного біотехнологічного університету

**Кісь Віктор Миколайович**,  
кандидат технічних наук, доцент кафедри  
мехатроніки, безпеки життєдіяльності та  
управління якістю Державного  
біотехнологічного університету

**Кісь Олександр Вікторович**,  
магістрант кафедри мехатроніки, безпеки  
життєдіяльності

та управління якістю Державного  
біотехнологічного університету

**Лещенко Євген Анатолійович**,  
магістрант кафедри мехатроніки, безпеки  
життєдіяльності

та управління якістю Державного  
біотехнологічного університету

**Liashenko Serhii**,  
Doctor of Technical Sciences, Professor,  
State Biotechnological University,  
<https://orcid.org/0000-0001-8304-9309>

**Kis Victor**,  
PhD in Technical Sciences, Associate Professor, State  
Biotechnological University,  
<https://orcid.org/0000-0002-7014-4873>

**Kis Oleksandr**,  
Master's student,  
State Biotechnology University,  
<https://orcid.org/0000-0002-0033-4495>

**Leshchenko Yevhenii**,  
Master's student, Department of Mechatronics, Life  
Safety and Quality Management State Biotechnology  
University

**ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ МОДЕЛІ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ДИФУЗІЇ ПРИ  
ВИРОБНИЦТВІ ЦУКРУ НА ОСНОВІ НЕЙРОМЕРЕЖЕВОЇ ІДЕНТИФІКАЦІЇ  
DETERMINATION THE PARAMETERS OF MODEL THE TECHNOLOGICAL PROCESS OF DIFFUSION  
IN SUGAR PRODUCTION ON THE BASIS OF NEURO NETWORK IDENTIFICATION**

Ляшенко С. О., Кісь В. М., Кісь О. В.,  
Лещенко Є. А. Визначення параметрів моделі  
технологічного процесу дифузії при  
виробництві цукру на основі нейромережевої  
ідентифікації. *Український журнал прикладної  
економіки та техніки*.  
2023. Том 8. № 1. С. 241 – 247.

Liashenko S., Kis V., Kis O., Leshchenko Y.  
Determination the parameters of model the  
technological process of diffusion in sugar  
production on the basis of neuro network  
identification. *Ukrainian Journal of Applied  
Economics and Technology*.  
2023. Volume 8. № 1, pp. 241 – 247.

*У роботі розглянуто важливість цукрової галузі в продовольчому забезпеченні країни. Цукрові заводи характеризуються складністю технологічних процесів. Проведено системний аналіз технологічного процесу дифузії і аналіз показників процесу дифузії в дифузійній установці. Наведено аналіз математичного забезпечення автоматизованих систем управління складних технологічних процесів. Проведено оцінювання матеріальних, якісних та енергетичних показників, а також формування необхідних інформаційних змінних, що дає можливість визначити структуру системи управління технологічним процесом. Для ефективного управління складним динамічним технологічним процесом дифузії запропоновано використовувати нейроуправління. Для визначення виду математичних моделей у системі автоматизованого управління технологічним процесом в дифузійному відділенні цукрового заводу розглянуто використання лінійних регресійних моделей. Під час побудови регресійних моделей було враховано значну кількість вхідних і вихідних складових технологічного дифузійного процесу. Було розглянуто два варіанти регресійних моделей процесу дифузії. Проведено аналіз отриманих регресійних моделей і визначено значимість показників процесу дифузії. Для більш адекватного опису складного процесу дифузії в автоматизованій системі управління запропоновано застосовувати моделі на основі нейромережевої ідентифікації. За основні показники процесу було взято значимі показники регресійних моделей. Побудова математичних моделей, які дають можливість адекватно реагувати на зміни технологічного процесу, зводиться до питання побудови нейромережевих моделей на основі багатопарового перцептронну та радіально базової мережі. З різного виду нейромережевих моделей було визначено найбільш ефективні структури моделей. Час спрацьовування управління під час використання запропонованої моделі склав 3 хвилини. Похибка ідентифікації отриманих моделей склала 5-7%.*

**Ключові слова:** дифузійна установка, математична модель, нейронна мережа, регресійне рівняння, управління, ідентифікація.

---

*The article considers the sugar industry's importance in the country's food supply. The complexity of technological processes characterizes sugar factories. A system analysis of the technical operation of diffusion and an analysis of indicators of the diffusion process in the diffusion equipment were carried out. An analysis of the mathematical support of automated control systems of complex technological processes is given. The assessment of material, quality, and energy indicators was carried out, as well as the formation of the necessary information variables, which makes it possible to determine the structure of the technological process control system. To effectively manage the complex dynamic technological process of diffusion, it is proposed to use neurocontrol. The use of linear regression models was considered to determine the type of mathematical models in the system of automated control of technological processes in the diffusion department of the sugar factory. When building regression models, a significant number of input and output components of the technology diffusion process were considered. Two variants of regression models of the diffusion process were considered. The obtained regression models were analyzed, and the significance of the indicators of the diffusion process was determined. For an adequate description of the complex diffusion process in an automated control system, it is proposed to use models based on neural network identification. Significant indicators of regression models were taken as the main indicators of the process. The construction of mathematical models that make it possible to respond to changes in the technological process adequately boils down to the issue of building neural network models based on a multilayer perceptron and a radial base network. The most effective model structures were determined from various types of neural network models. The control activation time when using the proposed model was 3 minutes. The error of identification of the received models was 5-7%.*

**Keywords:** diffusion equipment, mathematical model, neural network, regression equation, control, identification.

---

## Вступ

Важливим завданням цукрового виробництва в Україні є забезпечення населення цукром. Цукрове виробництво у переробній галузі є складним та енерговитратним комплексом і належить до основних продуктових галузей держави. Конкурентоспроможність цукрової продукції та енергоефективність виробництва залежить від виготовлення якісної продукції, яка має відповідати вимогам, що використовують провідні виробники цукру у Європі та світі. Сучасне високоєфективне цукрове виробництво характеризується такими показниками, як якість продукції, енергоефективність, собівартість. Підвищення ефективності цих показників забезпечується використанням найсучасніших технологій виробництва, обладнання, автоматизованих систем управління процесами та обладнанням, а також організацією цукрового виробництва [1].

Підприємства з виробництва цукру характеризуються складністю технологічних процесів, що призводить до питань підвищення ефективності виробництва у відділеннях цукрових заводів і є потужними споживачами теплової енергії і електроенергії. Підвищення вимог до якості цукрової продукції, що виробляється в Україні, до нормативних європейських вимог і вимог, що діють у країнах з розвинутою цукровою галуззю, дасть можливість отримувати конкурентоспроможну цукрову продукцію [2].

Аналіз схем роботи відділень заводу показує його складність, і для їх оптимізації необхідна корекція параметрів регуляторів технологічних процесів відповідно до змін у технології. Одним з найбільш складних та енергозатратних процесів у цукровому виробництві є процес дифузії. Ефективне управління технологічними процесами в цукровому виробництві здійснюється завдяки автоматизованим системам управління, що базуються на інтелектуальних системах управління. Найбільш поширеними на сьогодні є технології штучного інтелекту, що втілені в реальних базах знань та управління [3, 4]:

- експертні системи;
- нейромережеві підходи та нейроуправління;
- нечітка логіка.

Для вирішення завдання оптимізації процесу дифузії було б логічно використовувати сучасні методи управління, за рахунок використання нейромережевих підходів і нейроуправління в системі автоматизованого управління [4, 5].

Аналіз наукових праць щодо оптимізації режимів роботи виробничих об'єктів завдяки втіленню автоматизованого управління показує: управління локальними ТП було реалізовано на класичних підходах теорії управління, адаптивних та оптимальних систем. Математичні моделі здебільшого відображені лінійними системами, які можна реалізовувати за допомогою класичних ПД-регуляторів. Найбільше поширення на виробництві отримали системи автоматизованого управління, що реалізуються на основі пропорційних, інтегровальних, диференціальних регуляторів або їх комбінацій (П, ПІ, ПІД – регулятори) [4, 7]. ПІ та ПІД-регулятори характеризуються простотою структури та ефективністю у використанні. Але у них є і недоліки – ручне налаштування, під час зміни параметрів технологічних процесів. Ці недоліки стали причиною розвитку адаптивного керування, яке дає можливість змінювати параметри регулятора, залежно від критерію оптимальності замкнутої системи. Крім того ПІД-системи не

---

завжди можуть забезпечувати необхідну якість керування для складних ТП з властивостями нелінійності, нестаціонарності, інерційності, запізнення в часі, випадкових збурень, наявності нечіткої та неповної інформації про технологічний процес [6-8].

Основними недоліками адаптивних систем є те, що більшість алгоритмів адаптації отримані в умовах, де не були враховані неконтрольовані збурювальні дії та не визначені всі параметри об'єкта в процесі ідентифікації. Крім того, наявні алгоритми адаптації досить складні в реалізації, а процес адаптації займає тривалий час. На відміну від адаптивного керування, інтелектуальні системи управління мають можливості до «розуміння» та навчання, щодо об'єктів управління, збурень, зовнішнього середовища та умов праці [5-8].

Крім того, практична реалізація цифрових систем управління різноманітними детермінованими та стохастичними об'єктами, що реалізуються за допомогою мікропроцесорних засобів, здійснюється здебільшого під час управління лінійними об'єктами управління за допомогою комп'ютерної реалізації лінійних цифрових регуляторів [5, 7].

Дотримання і контроль цих показників, які дають можливість отримати якісну продукцію – дифузійний сік у дифузійному відділенні, якісні показники якого впливають на весь подальший хід технологічного процесу отримання цукру в інших відділеннях цукрового заводу, і який здійснюється і контролюється за допомогою АСУТП. Виходячи з аналізу питань щодо введення необхідних додаткових якісних показників технологічного процесу в математичне забезпечення АСУТП, можна відзначити, що основні зусилля необхідно скеровувати на розроблення ефективних оптимізаційних моделей, алгоритмів і критеріїв, що характеризують ТП дифузії [4, 7, 8, 9].

### **Визначення мети та цілей дослідження**

**Мета статті:** підвищення ефективності технологічного процесу дифузії соку у дифузійній установці шляхом втілення ефективних моделей у математичне забезпечення автоматизованої системи управління відділення, що функціонують за умов нестаціонарності та поточної невизначеності, з використанням нейромережевого підходу.

### **Виклад основного матеріалу дослідження**

Головні ознаки ТП характеризують кількісні і якісні показники його функціонування. Аналіз ТП також передбачає визначення та оцінювання їх структури, оцінювання матеріальних, якісних та енергетичних потоків, формування необхідних інформаційних змінних, що дає можливість визначити структуру системи управління [4-6].

Під час характеристики ТП з точки зору системного аналізу виділяють такі ознаки [4-8]:

- кількість складних систем, що зв'язані між собою;
- можливість управління підсистемами на основі різних критеріїв оптимальності;
- існування для підсистем завдань оперативної оптимізації;
- наявність ієрархічної структури.

Аналіз ТП також передбачає визначення та оцінювання структури, оцінювання матеріальних, якісних та енергетичних показників, формування необхідних інформаційних змінних, що дає можливість визначити структуру системи управління [4, 5]. На основі проведеного аналізу було визначено ефективність застосування нейромережевих (НМ) підходів і нейроуправління об'єктами. За допомогою нейроуправління та завдяки властивостям нейромереж, спільним для різних нелінійних динамічних об'єктів, вирішуються завдання ідентифікації, синтезу систем управління, їх аналізу та апаратної реалізації. Результати, отримані із застосуванням НМ у межах адаптивної постановки основного завдання теорії управління, легко можуть використовуватися і класичними підходами [5-8].

Для подальшого застосування однієї з поширених технологій інтелектуального управління – нейрокерування – для складних динамічних об'єктів найчастіше використовуються такі етапи:

- 1) формування та мета управління;
- 2) визначення об'єкта управління (ОУ) та визначення його меж;
- 3) створення загальної математичної моделі;
- 4) визначення параметрів моделі ОУ (ідентифікація);
- 5) синтез керування (тобто інтелектуального регулятора);
- 6) реалізація управління на основі визначеного алгоритму;
- 7) корекція та оптимізація окремих етапів керування.

Для нашого випадку – отримання моделей технологічного процесу дифузії в цукровому виробництві на основі нейромережевої багатомірної ідентифікації – у роботі достатньо розглянути перші чотири етапи [7, 8, 10].

Отже, для досягнення мети – вирішення проблеми побудови інтелектуальної системи управління ТП дифузії встановлюються такі завдання:

- визначення показників і динаміки зміни показників ТП дифузії;
- отримати регресивні моделі для процесу дифузії і визначення їх значимості для застосування цих показників у системі інтелектуальної ідентифікації;
- адаптувати наявні методи нейромережевої ідентифікації для багатовимірних і багатозв'язкових систем на прикладі ТП дифузії задля побудови математичної моделі в складі інтелектуальної системи управління [7].

Для визначення виду математичних моделей у системі математичного забезпечення під час застосування адаптивного підходу в системі автоматизованого управління технологічними процесами в дифузійному відділенні цукрового заводу розглянемо використання лінійних моделей в АСУТП [9].

Під час побудови оптимальних регуляторів для систем автоматизованого управління проводять статистичний аналіз основних збурень і параметрів об'єкта, що досліджується, для того щоб віднести їх до конкретного класу випадкових процесів.

За результатами експериментальних даних було розраховано накопичені частоти  $P_0(x)$ , очікувані накопичені частоти для нормального розподілу, а потім вибиралось максимальне значення  $|P_0(x) - S_x|$ , за допомогою якого визначався критерій згоди Колмогорова-Смірнова  $D$ . Значення порівнювали з критичним (табличним) і з 95% робили висновок відповідно до гіпотези про нормальний розподіл основних змінних підсистем, що розглядали.

До основних змінних процесу визначали такі статистичні характеристики: математичне очікування, дисперсія, медіана (яку розраховували, як оцінка центру експериментальних даних з викидами, які мінімально впливають на неї), коефіцієнт асиметрії, коефіцієнт ексцесу, а також центральні моменти. Крім того, було побудовано авто- та взаємкореляційні функції, спектральна густина та їх нормовані функції [9].

Вибір структури моделі, під яким розуміється визначення необхідної кількості регресорів, є одним з найважливіших етапів побудови моделі. Для вирішення цієї задачі необхідно побудувати регресійну модель дифузійного відділення, яка є важливою складовою в системі управління для отримання та подальшого якісного оброблення дифузійного соку у цукровому заводі. Під час побудови регресійної моделі роботи дифузійного апарата необхідно розглянути найбільшу кількість вхідних і вихідних складових технологічного процесу дифузії.

Відповідно, виходячи з аналізу процесу дифузії, було розглянуто два варіанти:

*Перший варіант.* У ролі вихідної продукції процесу отримання дифузійного соку, а відповідно і дифузійного апарата (ДА), який є основним агрегатом з отримання дифузійного соку, що задає режим роботи всього цукрового заводу, використовувалась одновихідна величина – витрати дифузійного соку ( $G_{дс}, \text{м}^3/\text{год}$ ).

*Другий варіант.* Розглянуто залежності сокостружкової суміші в кожній зоні секції дифузійного апарата ( $Q_i, i=1,4$ ) від інших параметрів процесу дифузії [9].

Розглядаючи перший варіант, вихідним параметром ( $Y$ ) було вибрано витрату дифузійного соку. Вхідними параметрами ( $X_{1-n}$ ) було вибрано:  $X_1$  – температура сокостружкової суміші від пари в 1-й зоні ДА, ( $Q_1, C^0$ );  $X_2$  – температура сокостружкової суміші від пари в 2-й зоні ДА, ( $Q_2, C^0$ );  $X_3$  – температура сокостружкової суміші від пари в 3-й зоні ДА, ( $Q_3, C^0$ );  $X_4$  – температура сокостружкової суміші від пари в 4-й зоні ДА, ( $Q_4, C^0$ );  $X_5$  – витрата сульфатованої барометричної води, ( $G_{дсо}^{ij}, \text{м}^3/\text{год}$ );  $X_6$  – витрата бурякової стружки, ( $G_c^{ij}, \text{т}/\text{год}$ );  $X_7$  – температура барометричної сульфатованої води, ( $Q_7, C^0$ ).

Крім того, у ролі інформаційних параметрів, необхідних для реагування та фіксації змін технологічних процесів, використовували:  $X_8$  – рівень ємності сульфатованої підігрітої барометричної води;  $X_9$  – температура ємності з підігрітою барометричною водою;  $X_{10}$  – витрата живильної води;  $X_{11}$  – витрата жомпресової води;  $X_{12}$  – рівень дифузійного соку в ємності;  $X_{13}$  – рівень перед ситом ДА;  $X_{14}$  – рівень сокостружкової суміші (4, 8, 12, 16 м);  $X_{15}$  – температура живильної води в ДА;  $X_{16}$  – рН барометричної води;  $X_{17}$  – рівень барометричної води в ємності після конденсатору;  $X_{18}$  – температура соку на виробництво;  $X_{19}$  – рН соку на виробництво;  $X_{20}$  –

СВ соку на виробництво;  $X_{21-61}$  – контроль роботи вузлів обладнання в дифузійному відділенні цукрового заводу.

Наступним етапом було визначено основні статистичні дані процесу дифузії, оброблення їх та матриці коефіцієнтів кореляції. Визначення структури моделі для опису процесу дифузії здійснювалось методом покрокової регресії. У табл. 1 наведено значення коефіцієнтів детермінації, які є мірою згоди відповідної моделі регресії з наведеними даними [9].

**Таблиця 1. Значення коефіцієнтів детермінації**

$X_i$	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$	$X_6$	$X_7$
1	2	3	4	5	6	7	8
R <sup>2</sup>	0,571	0,618	0,645	0,659	0,670	0,692	0,71

Після застосування МНК отримано таку модель:

$$Y = 63,27 + 12,65X_1 + 9,435X_2 + 18,42X_3 + 10,63X_4 - 3,657X_5 + 24,3X_6 + 7,36X_7 \quad (1)$$

Значення критерію Фішера для цієї моделі становить  $F_{розр} = 162,3$  за  $F_{табл} = 4,36$ , значення критерію Стюдента  $t_{розр} = 3,67$  при  $t_{табл} = 2,78$ .

Розглядаючи другий варіант, вихідними параметрами ДА було визначено:  $Y_1$  – температуру сокостружкової суміші в 1-й зоні ДА ( $Q_1, C^0$ );  $Y_2$  – температуру сокостружкової суміші в 2-й зоні ДА, ( $Q_2, C^0$ );  $Y_3$  – температуру сокостружкової суміші в 3-й зоні ДА, ( $Q_3, C^0$ );  $Y_4$  – температуру сокостружкової суміші в 4-й зоні ДА, ( $Q_4, C^0$ ).

Вхідними (керованими) параметрами ДА були:  $X_1$  – витрата стружки, ( $G_c^{ij}, M^3/год$ );  $X_2$  – витрата дифузійного соку, ( $G_{дсо}^{ij}, M^3/год$ );  $X_3$  – витрата живильної води, ( $G_v^{ij}, M^3/год$ );  $X_4$  – температура барометричної сульфітованої води, ( $Q_6, C^0$ );  $X_5$  – температура жомопресової води, ( $Q_ж, C^0$ ). Окрім параметрів, що беруть участь у пасивному експерименті, використовували й інформаційні параметри.

Під час визначення структур моделей для другого варіанта також використовували результати статистичного аналізу для процесу дифузії. У результаті було отримано моделі ДА, що характеризують залежності температури сокостружкової суміші в  $i$ -зоні ( $i = 1 - 4$ ) ДА  $Y_i$  від вхідних параметрів методом покрокової регресії.

Після застосування МНК отримали такі моделі для чотирьох зон ДА:

$$Y_1 = 4,352 + 10,794X_1 - 0,292X_2 + 0,006X_3 + 0,730X_4 + 0,30X_5; \quad (2)$$

$$Y_2 = 21,176 + 17,973X_1 - 0,255X_2 + 0,0065 + 0,693X_4 + 0,730X_5; \quad (3)$$

$$Y_3 = 3,091 + 7,794X_1 - 0,479X_2 + 0,016X_3 + 0,87X_4 + 0,19X_5; \quad (4)$$

$$Y_4 = 18,378 + 11,49X_1 - 0,482X_2 + 0,012X_3 + 0,566X_4 + 0,472X_5. \quad (5)$$

Значення критеріїв Фішера наведені в табл. 2.

Порівнюючи значення критеріїв Фішера для отриманих моделей в 4-х зонах ДА з табличним, ми відзначаємо, що умова ( $F_{розр} > F_{табл}$ ) виконується, відповідно, отримані математичні моделі у першому наближенні можна використовувати для управління параметрами технологічного процесу дифузії. Значення критеріїв Стюдента для визначення значимості відповідних параметрів наведені в табл. 3 ( $t_{табл} - 1,94$ ). Аналізуючи отримані значення для критеріїв Стюдента бачимо, що для отриманих моделей наведені параметри за ступенем впливу їх коефіцієнтів на управляючий параметр значимі, і їх необхідно враховувати під час розрахунку вихідного параметру технологічного процесу.

**Таблиця 2. Значення критеріїв Фішера для математичних моделей ДА**

$F_{розр}$				$F_{табл}$
1 зона $Y_1$	2 зона $Y_2$	3 зона $Y_3$	4 зона $Y_4$	
1	2	3	4	5
397,2	264,6	178,4	283,7	3,23

Через те, що процес дифузії належить до складних та енергоєфективних – параметри показників суміші постійно змінюються від зміни якості буряка, температури, подачі пари під час змін якості стружки та інших складових – отримані регресійні моделі (1-5) задовольняють процес автоматизованого управління технологічним процесом дифузії тільки в умовах стаціонарності. Крім того, отримані моделі дають можливість визначити основні технологічні показники впливу на технологічний процес дифузії.

Для того щоб здійснювати управління технологічним процесом дифузії в умовах нестаціонарності та перешкод, необхідне втілення в систему управління ТП дифузії математичних моделей, які дадуть можливість більш ефективно контролювати та реагувати на зміни в технологічному процесі. Тому останніми роками знайшли розвиток і застосування математичні моделі ТП, побудовані на основі нейромережевої багатомірної ідентифікації, яка забезпечує узагальнення досвіду уніфікації процесу побудови моделей ТП цукрового виробництва.

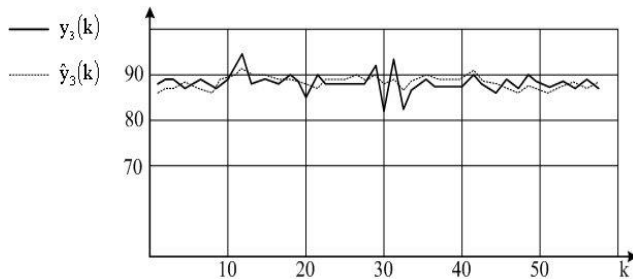
**Таблиця 3. Значення критеріїв Стюдента математичних моделей для відповідних параметрів дифузійного апарата**

Умовне позначення параметрів	$t$ - критерій			
	$Y_1$	$Y_2$	$Y_3$	$Y_4$
	1-а зона	2-а зона	3-а зона	4-а зона
$X_1$	6,15	3,95	4,25	3,85
$X_2$	7,53	5,45	4,78	5,36
$X_3$	7,69	5,08	5,30	5,85
$X_4$	7,83	6,34	5,80	6,12
$X_5$	7,98	7,26	6,20	6,25

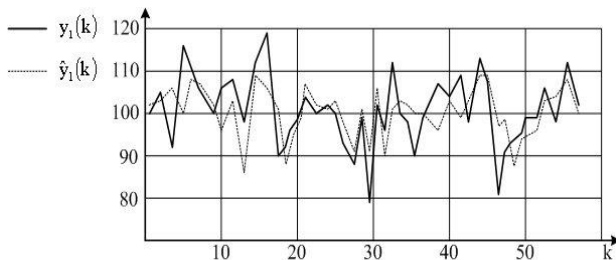
За нейромережевого підходу, об'єкт, який досліджують, розглядають у вигляді нейронної мережі, у якій, крім вхідних і вихідних показників, є кілька прихованих шарів, які складаються з певної кількості нейронів, які реалізують задану базисну функцію (функцію активації). Для ідентифікації об'єкта вибирають модель, що базується на апіорній інформації щодо класу, якого вона стосується. У нашому випадку застосовано неромережевий підхід для вирішення проблеми підвищення ефективності ТП дифузії шляхом втілення математичних моделей, які дають можливість адекватно реагувати в системі управління на зміни ТП, і зводиться до питання побудови нейромережевих моделей на основі багатозарового перцептрон (БШП) або радіально базової мережі (РБМ). Під час використання БШП навчання мережі здійснювалось за алгоритмом Левенберга-Марквардта [4, 5, 8].

Деякі результати моделювання наведені на рис. 1 та 2.

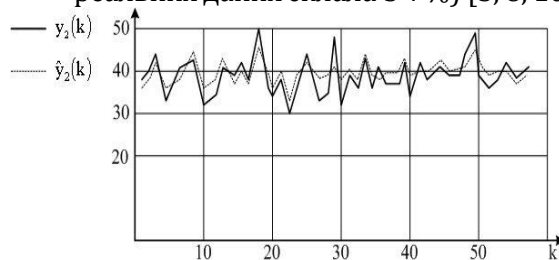
Рис. 1 відповідає моделі (1), а рисунок 2 – моделям (2-5). Дані нелінійних моделей були отримані різними каналами  $y_i(k) = f(u_1(k), \dots, u_{11}(k))$ .  $k = \overline{1, 100}$  ( $y_i(k)$  – вихідний показник,  $f(u_1(k), \dots, u_{11}(k))$  – вхідні показники) за допомогою п'яти двозарових перцептронів 2-7-5-1, час навчання складав приблизно 3 хвилини.



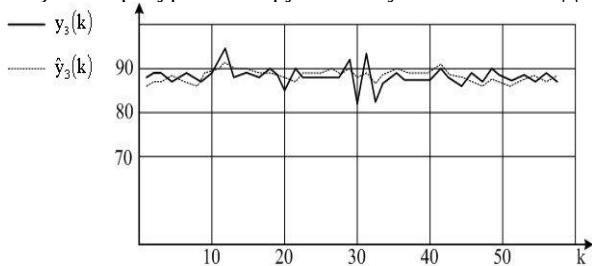
**Рис. 1. Зміни реальної  $y$  та модельної  $\hat{y}$  змінних відділення дифузії, що відповідає моделі (1)**



а) температура сокостружкової суміші в 1-й зоні ДА;



б) температура сокостружкової суміші в 2-й зоні ДА;



в) температура сокостружкової суміші в 3-й зоні ДА;



г) температура сокостружкової суміші в 4-й зоні ДА

**Рис. 2. Зміни реальних  $y$  та модельних  $\hat{y}$  змінних відділення дифузії, що відповідають моделям (2-5)**

Наведений підхід дає можливість формалізувати опис складних нелінійних технологічних об'єктів у цукровому виробництві для ідентифікації моделей цих об'єктів.

### Висновки та перспективи подальших розвідок

У результаті досліджень було отримано різного виду регресійні моделі процесу дифузії на цукровому заводі, визначено їх ефективність і значимість отриманих показників. На основі отриманих регресійних моделей і застосування комп'ютерного моделювання були отримані

---

нейромережеві моделі ТП цукрового виробництва, що базуються на БШП та РБМ. Завдяки запропонованим нейромережевим моделям було визначено ефективні структури нейронної мережі, з використанням алгоритму навчання Левенберга-Маркуардта, що дають можливість отримати задовільний час спрацьовування для АСУТП дифузії цукрового заводу. Водночас похибка ідентифікації склала 5-7%. Запропонований підхід щодо застосування ідентифікації параметрів нейромережевих моделей у математичному забезпеченні АСУТП в дифузійному відділенні можна застосовувати і в інших відділеннях цукрового заводу.

## Список літератури

1. Ладанюк А. П., Трегуб В. Г., Ельперін І. В., Цюцюра В. Д. Автоматизація технологічних процесів і виробництв харчової промисловості: підручник. К.: Аграрна освіта, 2001. 224 с.
2. Домарецький В.А. Загальні технології харчових виробництв. К.: Університет «Україна», 2010. 814 с.
3. Автоматизація технологічних процесів і виробництв харчової промисловості: монографія. / А. П. Ладанюк, О. А. Ладанюк, Р. О. Бойко, В. В. Іващук, Д. О. Кроніковський, Д. А. Шумігай. К.: Інтер Логістик Україна, 2015. 408 с.
4. Norgaard M., Ravn O., Poulsen N.K., Hansen L.K. Neural Networks for Modelling and Control of Dynamic Systems. Springer: London. 2000. 287 p.
5. Апостолюк В. О., Апостолюк О. С. Інтелектуальні системи керування: конспект лекцій. К.: НТУУ «КПІ», 2008. 88 с.
6. Купін А. І., Сенько А. О., Мисько Б. С. Ідентифікація та автоматизоване керування в умовах процесів збагачувальної технології на основі методів обчислювального інтелекту / 2-ге вид., перероб. і доп. Кривий Ріг: Синельников Д. А., 2019. 298 с.
7. Ayoubi M. Nonlinear system identification based on neural networks with locally distributed dynamics and application to technical processes. Düsseldorf: VDI – Verlag, 1996. 168 p.
8. Руденко О.Г., Бессонов А.А. Адаптивное управление нелинейными объектами с помощью нейронной сети СМАС. *Проблемы управления и информатики*. No 5. 2004. С. 14–28.
9. Ляшенко С. А. Построение линейной регрессионной модели диффузионного отделения сахарного производства. *Вісник НТУ «ХПІ»*. – Збірник наукових праць. Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології. Х.: НТУ «ХПІ». 2014. № 55(1097). С. 58–64.
10. Руденко О. Г., Бодяньський Є. В. Штучні нейронні мережі: навчальний посібник. Харків: ТОВ «Компанія СМІТ». 2006. 404 с.

## References

1. Ladaniuk, A. P., Trehub, V. H., El'perin, I. V., Tsiutsiura, V. D. (2001). *Avtomatyzatsiia tekhnolohichnykh protsesiv i vyrobnytstv kharchovoi promyslovosti*. [Automation of technological processes and production of the food industry]. Agrarna osvita. Kyiv. Ukraine.
2. Domarets'kyj, V.A. (2010). *Zahal'ni tekhnolohii kharchovykh vyrobnytstv*. [General technologies of food production]. Universytet «Ukraina». Kyiv. Ukraine.
3. *Avtomatyzatsiia tekhnolohichnykh protsesiv i vyrobnytstv kharchovoi promyslovosti*. (2015). [Automation of technological processes and productions of the food industry]. Ladaniuk, A. P., Ladaniuk, O. A., Bojko, R. O., Ivaschuk, V. V., Kronikovs'kyj, D. O., Shumihaj, D. A. Inter Lohityk Ukraina. c
4. Norgaard, M., Ravn, O., Poulsen, N.K., Hansen, L.K. (2000). *Neural Networks for Modelling and Control of Dynamic Systems*. Springer: London.
5. Apostoliuk, V. O., Apostoliuk, O. S. (2008). *Intelektual'ni systemy keruvannia: konspekt lektsij*. [Intelligent control systems: lecture notes]. NTUU «KPI». Kyiv. Ukraine.
6. Kupin, A. I., Sen'ko, A. O., Mys'ko, B. S. (2019). *Identyfikatsiia ta avtomatyzovane keruvannia v umovakh protsesiv zbahachuval'noi tekhnolohii na osnovi metodiv obchysliuval'noho intelektu*. [Identification and automated control in the conditions of beneficiation technology processes based on computational intelligence methods]. 2<sup>nd</sup> ed., Syniel'nikov D. A., Kryvyj Rih. Ukraine.
7. Ayoubi, M. (1996). *Nonlinear system identification based on neural networks with locally distributed dynamics and application to technical processes*. Düsseldorf: VDI – Verlag.
8. Rudenko, O.H., Bessonov, A.A. (2004). «Adaptive control of nonlinear objects using the SMAS neural network». *Problemy upravleniia y ynformatyky*. No 5, pp. 14–28.
9. Liashenko, S. A. (2014). «Construction of a linear regression model of the diffusion department of sugar production». *Visnyk NTU «KhPI»*. – *Zbirnyk naukovykh prats'*. Serii: *Systemnyj analiz, upravlinnia ta informatsijni tekhnolohii*. NTU «KhPI». № 55(1097). Kharkiv. pp. 58–64.
10. Rudenko, O. H., Bodians'kyj, Ye. V. (2006). *Shtuchni nejronni merezhi: navchal'nyj posibnyk*. TOV «Kompaniia SMIT». Kharkiv. Ukraine.

Стаття надійшла до редакції 15.01.2023 р.