

УДК 681.324

## **IMPROVING THE QUALITY OF TECHNOLOGICAL OBJECTS CONTROL BASED ON NEURO-FUZZY METHODS**

**A. Ladanyuk, A. Bezuhlov**

*National University of Food Technologies*

---

**Key words:**

*Intellectual methods  
Neuro-Fuzzy networks  
Beet processing section  
Optimization  
Control modeling*

---

**Article history:**

Received 05.04.2016  
Received in revised form  
25.04.2016  
Accepted 15.05.2016

---

**Corresponding author:**

A. Ladanyuk  
**E-mail:**  
ladanyuk@ukr.net

---

**ABSTRACT**

The method based on neuro-fuzzy logic is considered in the article. This method is aimed at increasing the quality control of beet processing unit. The analysis and estimation were performed for determining the possibility of using neuro-fuzzy methods for beet processing unit control. The temperature mode control of sloped diffusion unit was chosen as an object under investigation. Membership functions have been formed for chosen neuro-fuzzy network by using modeling data. This ANFIS network has been trained dynamics for controlling the temperature mode. Control effectiveness of neuro-fuzzy network was compared with the operation of optimally configured PID-controller. The results of operation of neuro-fuzzy networks presented in timetables of transients demonstrate better performance and efficiency of technological mode of sloped diffusion unit, which supports the further use of this approach and its development.

---

## **ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ РЕГУЛЮВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ НА ОСНОВІ НЕЙРОНЕЧІТКИХ МЕТОДІВ**

**А.П. Ладанюк, А.О. Безуглов**

*Національний університет харчових технологій*

*У статті обраний метод побудовано на нейронечіткій логіці, що дасть змогу підвищити якість регулювання бурякопереробним відділенням. Аналіз та оцінка проведені для визначення можливості використання нейронечітких методів в управлінні бурякопереробним відділенням. Об'єктом дослідження обрано управління температурним режимом похилого дифузійного апарата. Для обраної нейронечіткої мережі сформовано функції належності на основі дослідних даних. Нейронечітка мережа ANFIS навчена динаміці для управління температурним режимом, ефективність управління нейронечіткої мережі порівнюється з роботою оптимально налаштованих ПІД регуляторів. Результати роботи нейронечіткої мережі за графіками перехідних процесів демонструють кращу швидкодію й ефективність управління технологічним режимом дифузійної установки, що підтверджує доцільність використання даного підходу в подальшому та його вдосконалення.*

**Ключові слова:** інтелектуальні методи, нейронечіткі мережі, бурякопереробне відділення, оптимізація процесів, регулювання, моделювання.

**Постановка проблеми.** На прикладі бурякопереробного відділення цукрового заводу показана можливість підвищення якості й ефективності регулювання на основі сучасних підходів, зокрема нейронечітких методів. Бурякопереробне відділення займає особливе місце в структурі системи керування цукровим виробництвом, де формуються основні кількісні та якісні показники функціонування всього підприємства. В системах автоматизації, як правило, використовуються окремі одноконтурні системи та регулятори для стабілізації технологічних змінних (підтримання температури, витрати тощо). Для покращення показників функціонування технологічних комплексів необхідно враховувати взаємні зв'язки між окремими частинами бурякопереробного відділення: бурякорізками, транспортерами, дифузійними апаратами, збірниками тощо. З урахуванням інформаційних і ситуаційних невизначеностей у статті розглядається можливість використання нейронечітких мереж.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Бурякопереробне відділення включає системи автоматизації, в яких здійснюється одноконтурне управління з елементами оптимізації, а останнім часом використовуються системи підтримки прийняття рішень [1, 2]. В технічній літературі відомі праці, у яких розглядаються особливості проведення термодинамічних і гідромеханічних процесів у дифузійних установках, а в системах автоматизації використовуються класичні ПІ та ПІД регулятори. З огляду на останні дослідження й моделювання процесами управління цукрових заводів для відділень сокоочистки та випарювання за допомогою інтелектуальних методів виникла необхідність розробки складних інтелектуальних систем управління для відділення обробки цукрових буряків і дифузії.

**Мета статті.** Дослідити можливість підвищення ефективності систем автоматичного регулювання (САР) за допомогою використання нейронних нечітких мереж при керуванні бурякопереробними відділеннями цукрових заводів, провести аналіз технічної літератури для оцінки можливості використання нейронечітких методів автоматизації бурякопереробним відділенням.

**Викладення основних результатів дослідження.** Нейронечіткі мережі відносяться до інтелектуальних систем, що починають активно використовуватись у хімічній, нафтохімічній та інших галузях промисловості [3]. В харчовій промисловості використовуються складні технологічні об'єкти, в тому числі технологічні комплекси, що потребує розробки методології використання інтелектуальних систем керування, зокрема нейронечітких методів, які нададуть можливість врахувати складні внутрішні зв'язки й залежності виникнення збурень та існування невизначеностей.

В інтегрованих автоматизованих системах управління (ІАСУ) розв'язується комплекс задач на різних рівнях, в тому числі задача оптимізації, де критерієм оптимальності виступає економічність на верхньому рівні управління, питомі втрати цукру по стадіях технологічного комплексу, що залежить від багатьох технологічних факторів. Ці критерії мають техніко-економічний характер, а локальною метою автоматизації є ритмічність виробництва:

$$\min_{n \in U} K_s = \sum_{i=1}^m \rho_i |\Delta Q_i| \Delta t, \quad (1)$$

де  $\Delta Q_i$  — відхилення продуктивності  $S$  — підсистеми технологічного комплексу за  $i$ -м продуктом;  $U$  — керувальні дії;  $\rho$  — коефіцієнт штрафу, що залежить від створення запасів у технологічних місткостях, від часу простоїв технологічного обладнання та систем управління;  $\Delta t$  — часовий інтервал.

На нижньому рівні при розв'язанні задачі оптимізації формуються керувальні дії, які оптимізують досягнення визначеності керувальних змінних  $U$ , що оптимізують математичне сподівання критерію  $K_s$ :

$$\min M \{K_s(\rho_i, \Delta Q_i)\}, \quad (2)$$

з детермінованими

$$f_i(X, Z) \leq b_i \quad (3)$$

та ймовірнісними обмеженнями

$$P(\underline{a}_j \leq f_j \leq \bar{a}_j) \geq P_j, \quad (4)$$

де  $P_j$  — задані значення ймовірності;  $X, Z$  — вектори, відповідно, режимних параметрів і показників якості продукції.

Такий підхід дозволяє здійснювати оптимізацію окремих підсистем бурякопереробного відділення та системи в цілому. Були здійснені спроби реалізувати управління за допомогою нейронних радіально-базисних мереж. Отримані результати показали кращу якість управління порівняно з класичними регуляторами за визначеними параметрами [4]. Однак такі дослідження не враховували ряд факторів, які визначають (характеризують) бурякопереробне відділення як цілісну підсистему чи систему цукрового заводу, зважаючи на зв'язки між змінними та внутрішньо невизначені впливи, що не можуть бути явно регламентовані навіть можливостями й навчальними потужностями нейронних мереж.

Для розробки математичних моделей, які можна використовувати в системах автоматизації, необхідно врахувати складні тепломасообмінні та гідродинамічні процеси [4], однак складність математичної моделі об'єкта визначається рядом припущень. На противагу цьому застосовуються моделі представлень нейронечітких мереж, які можуть бути створені на основі математичних моделей, де динаміка їх функціонування за допомогою процесів навчання із реальними даними з виробництва (часовими рядами) збільшує їх адекватність і точність.

Для визначення вимог до показників якості виділяють параметри, які можна коригувати, проте в реальному часі ці параметри є невимірюваними. У похилих дифузійних установках такими є відбір дифузійного соку  $F$ , температурний режим  $T$  і час дифузії  $H_2$ :

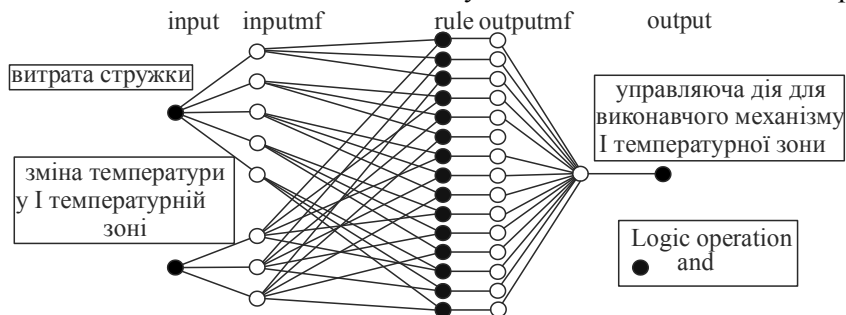
$$D_2 = f_{D_2}(F, H_2, T). \quad (5)$$

Особливістю цих параметрів є їх невимірюваність, тому для розрахунків застосовуємо нейронечіткі алгоритми, що не потребують чіткого математичного опису й однозначного опису взаємозв'язків між цими параметрами, які вони отримують із навчальних баз даних і послідовностей їх подання автоматичній системі. Це дозволило отримати рекомендації щодо управління з розрахованим ступенем істинності, що виглядає як зміна їх числових значень і

залежностей між ними [5]. Динамічні характеристики набору даних являють собою значну проблему для традиційних моделей на конекціоністській основі з точки зору наявності відповідної структури для моделювання процесу, а також реалізації алгоритму навчання, який може доповнюватися в режимі навчальних та експериментальних проходів. З цих причин традиційні для нейронних мереж алгоритми навчання, такі як навчання за зворотнім поширенням помилки, не є придатними.

На сьогодні відомо ряд стандартних структур нейронечітких мереж, які використовуються для різних цілей, наприклад, для оцінки процесу функціонування — мережа ANFIS (запропонована Р. Янгом у 1993 р.). В той же час у технічній літературі описується ряд інших мереж, які мають широкі функціональні можливості, так звані NEFCLASS (Р. Круз у 1995 р.), та Fuzzy Neural Network (FuNN) (Н.К. Касабов, Дж. Кім, М. Вотсон та А. Грей у 1996 р.) [6]. Характерною ознакою таких мереж є нечітка логіка у їх структурі, мережі NEFCLASS мають нечіткі нейрони всіх шарів, а структура мережі залежить від бази знань. Кількість нейронів, що обчислюють дані, зростає прямо пропорційно до кількості даних, що призводить до високих обчислювальних навантажень; мережі FuNN мають спеціально розроблену структуру, у якій елементи всіх шарів мережі виконують конкретні ввірені функції. Також функції належності таких нейронів змінюються випадковим чином, що не завжди надає можливість їх використання у задачах регулювання.

У даній статті розглянуто один із методів управління підсистемою теплообмінної частини похилого дифузійного апарата за допомогою адаптивної нейронної мережі з нечітким виводом (ANFIS). Технологічні об'єкти завжди розглядаються з різних точок зору: за призначенням, за особливістю процесу функціонування та за можливістю ефективного керування ним (задача оцінка стану об'єкта, діагностика, прогнозування та формування ефективних керувальних дій). Об'єктом дослідження обрано управління тепловим режимом дифузійного апарата на основі нейронечітких регуляторів. На рис. 1 представлена нейронечітка мережа управління температурою у першій температурній зоні похилого дифузійного апарата. Система має два входи і один вихід. У дослідженні для всіх теплообмінних зон були синтезовані аналогічні мережі.

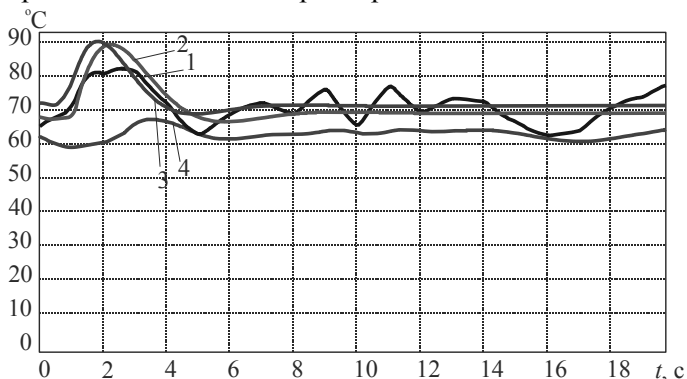


**Рис. 1. Структура нейронечіткої мережі**

Обрану систему навчили інверсійній динаміці об'єкта для отримання адекватного управління у стаціонарному режимі. Таким чином, було синтезовано регулятор для першої зони апарата. Для розробки адекватного управління, з

урахуванням можливих змін якості продукту на вході, завдяки обраному алгоритму нечіткого висновку Сугено, регулятор навчено послідовності експериментальних циклів з даними після підстановки в систему із заданими відповідними вихідними реакціями на вхідні дії.

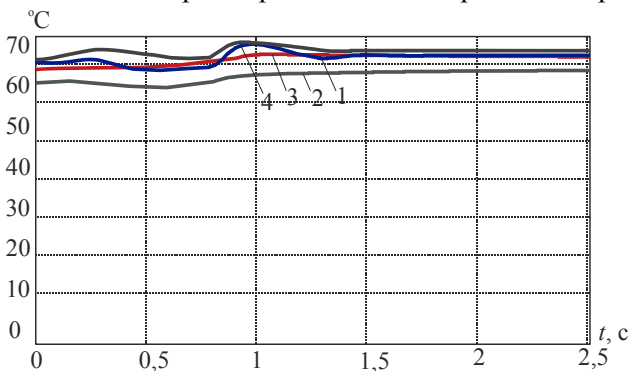
Для оцінки якості даного регулятора після його навчання порівнюємо його із класичним регулятором. Для даного технологічного об'єкта було обрано ПІД регулятори з оптимальними параметрами для кожної із зон.



**Рис. 2. Перехідні процеси з ПІД регулятором за управлінням;**  
I зона — 1, II зона — 2, III зона — 3, IV зона — 4

Рис. 2 відображає поведінку системи з ПІД регулятором при виникненні збурень різного характеру, що виводять з рівноваги частину системи. Таким збуренням може бути неоднорідність (буряки поганої якості) сировини. Регулювання призводить до надлишкових витрат тепла й продукції, що підвищує собівартість товару та його якість на виході.

Нейронечіткі мережі розробляються з урахування компенсації збурень і зміни завдання у дозволених режимом роботи дифузійного апарата межах. Мета його синтезу — управління режимом установки, мета високого рівня управління — мінімізація втрат сировинних та енергетичних ресурсів.



**Рис. 3. Перехідні процеси у системі за допомогою**  
нейронечіткої мережі ANFIS; I зона — 1, II зона — 2, III зона — 3, IV зона — 4

Результат, відображений на рис. 3, та аналогічне моделювання для інших трьох теплообмінних зон дає змогу зробити два висновки:

- збурення не змінює жоден із режимів управління та не виводить зі стану рівноваги, до того ж очевидно, що динамічна й статична похибки знаходяться у відповідних якості управління межах;

- вхідні дані з великою кількістю відмінностей від навчальних не погіршують якості системи, досягається кращий астатизм і зменшується перерегулювання.

Для нейронечіткої системи середньоквадратичне відхилення (RMSE) становило при налагоджуванні системи  $0,004618$  ( $^{\circ}\text{C}$ )<sup>2</sup> при обробці Testing data та  $0,003159$  ( $^{\circ}\text{C}$ )<sup>2</sup> при обробці Cheking data, що відповідає необхідним умовам якості управління.

Для отримання якісних результатів вибрані трикутні функції належності для середніх значень параметрів (нижче норми, норма, вище норми — для витрати; та норма — для температури). Для крайніх значень цих параметрів були обрані функції належності S-виду, Z-виду для відображення повної приналежності відповідних параметрів, низької та високої витрати та, відповідно, температури, завдяки чому була зменшена середньоквадратична похибка відхилення параметрів для стохастичного процесу.

Проведені експерименти засвідчують переваги нейронечіткого регулювання за рахунок зменшеного часу виходу на усталене значення, менше порівняно з ПІД-регуляторами динамічної та середньоквадратичної похибки. Перевагами можна вважати можливості нейронечітких регуляторів в області адаптації до режимів пристроїв та урахування факторів неоднорідності вхідних параметрів. У той же час межі адекватності, відповідність задачі та її розв'язання мають бути одного рівня складності. Також відмітимо необхідність навчання та налаштування параметрів нейронечітких регуляторів, що може збільшити оперативний час розробки проекту.

### Висновки

Створення інтелектуальних систем керування — актуальне завдання для покращення якості й ефективності функціонування технологічних об'єктів порівняно з класичними одноконтурними системами керування. Нейронечіткі мережі мають здатність до навчання, пристосованість, багаторежимність, тому можна розробити управління підсистемами, системами або технологічними рівнями цукрового заводу з якісно поліпшеними показниками. Розробка та дослідження нейронечітких систем управління сприяють розв'язанню широкого кола проблем, пов'язаних із внутрішніми зв'язками змінних при управлінні складними технологічними об'єктами, що представляють великий інтерес для промисловості в цілому.

### Література

1. *Онищенко Ю.В.* Оптимальне управління технологічним комплексом бурякопереробного відділення / Ю.В. Онищенко, В.Д. Кишенько, А.П. Ладанюк // Наукові праці Українського державного університету харчових технологій. — Київ : УДУХТ, 2000. — С. 91—92.
2. *Пупена О.М.* Керування технологічним процесом як складною багатозв'язною системою / О.М. Пупена, В.М. Сідлецький // Наукові праці національного університету харчових технологій. — 2014. — Т. 20, № 5. — С. 17—27.
3. *Ковалюк Д.А.* Сравнение систем управления с различными типами регуляторов / Д.А. Ковалюк, О.А. Ковалюк // Наукові праці ВНТУ. — 2015. — № 1. — С. 1—7.

4. Кравчук А.Ф. Макрокинетическая модель последовательного процесса производства диффузионного сока / А.Ф. Кравчук // Сахар. — 2013. — № 8. — С. 44—49.

5. Ляшенко С.А. Моделирование интеллектуальной системы управления технологическими процессами сахарного производства / С.А. Ляшенко // Агротехника и энергообеспечение. — 2014. — № 3. — С. 6—14.

6. Abraham A. Beyond integrated neuro-fuzzy systems: reviews, prospects, perspectives and directions / Ajith Abraham // Brno University of Technology. — 2001. — # 6. — P. 367—371.

## **ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА РЕГУЛИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ НА ОСНОВЕ НЕЙРОНЕЧЕТКИХ МЕТОДОВ**

**А.П. Ладанюк, А.А. Безуглов**

*Национальный университет пищевых технологий*

*В статье выбран метод, построенный на нейронечеткой логике, что позволяет повысить качество регулирования свеклоперерабатывающим отделением. Проведены анализ и оценка для определения возможности использования нейронечетких методов в управлении свеклоперерабатывающим отделением. Объектом исследования избрано управление температурным режимом наклонного диффузионного аппарата. Для выбранной нейронечеткой сети сформированы функции принадлежности на основе опытных данных. Нейронечеткая сеть ANFIS обучена динамике для управления температурным режимом. Эффективность управления нейронечеткой сети сравнивается с работой оптимально настроенных ПИД-регуляторов. Результаты работы нейронечеткой сети по графикам переходных процессов демонстрируют лучшее быстроедействие и эффективность управления технологическим режимом диффузионной установки, что подтверждает целесообразность использования данного подхода в дальнейшем и его совершенствования.*

**Ключевые слова:** интеллектуальные методы, нейронечеткие сети, свеклоперерабатывающее отделение, оптимизация процессов, регулирование, моделирование.