

О. В. Пугановський, ст. викладач, І. Л. Красніков, канд. техн. наук, доцент,
В. О. Лобойко, канд. техн. наук, доцент

ГІБРИДНА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ РОЗПИЛЮВАЛЬНИМ СУШІННЯМ ЕКСТРАКТУ З НЕЙРО-НЕЧІТКОЮ КОРЕКЦІЄЮ ЗАВДАНЬ

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

Ключові слова: розпилювальне сушіння, нейро-нечітка мережа, ANFIS, ПД-регулятор, корекція завдань, MATLAB/Simulink.

Вступ. Розпилювальне сушіння екстрактів у харчовій промисловості є складним багатопараметричним процесом, у якому якість порошку та стабільність режиму залежать від взаємопов'язаних тепломасообмінних явищ, запізнювань і технічних обмежень обладнання. У публікаціях із технології розпилювального сушіння показано, що вихідні характеристики сушарки, зокрема температура відпрацьованих газів і вологість продукту, мають нелінійний характер і високу чутливість до зміни умов процесу та параметрів середовища [1,2]. Для процесів, де необхідно забезпечити стабільність якості та збереження аромату продукту, важливе точне керування температурними умовами сушіння [3]. Дослідження енергетичних характеристик сушіння показують, що оптимізація керування повинна враховувати не лише якість, а й енергетичну ефективність та витрати виробництва [4].

У сфері автоматичного керування розпилювальними сушарками основним залишається підхід із локальними регуляторами, однак доведено доцільність застосування розширених стратегій керування, орієнтованих на узгодження взаємодіючих контурів [5,6]. Розроблено методи оптимального синтезу регуляторів для процесів сушіння, які враховують взаємозалежність параметрів і запізнювання [5]. Також порівнювалися підходи до керування, спрямовані на підвищення ефективності та стабільності при зміні режимів роботи сушарки [6]. Серед сучасних напрямів відзначається модельно-предиктивне керування, у якому використовується модель сушарки для прогнозування стану системи й формування оптимальних дій у реальному часі [7].

Паралельно розвиваються інтелектуальні методи керування, засновані на нейромережових і нейро-нечітких моделях. Нейромережові системи забезпечують високу здатність до апроксимації, але потребують великих масивів експериментальних даних і мають обмежену інтерпретованість результатів. Нечіткі системи типу Мамдані або Такагі–Сугено дозволяють формувати правила на основі експертних знань, але їх параметри складно оптимізувати вручну. Поєднання цих підходів у вигляді нейро-нечітких систем (Neuro-Fuzzy Systems) забезпечує одночасно адаптивність і пояснюваність моделі [8,9]. Найбільш поширеним варіантом такої структури є ANFIS (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System), запропонований Дж. Джангом [10], що реалізує нечіткий вивід типу Такагі–Сугено [8] та дозволяє навчати параметри правил і функцій належності за даними. ANFIS продемонстрував ефективність у задачах моделювання та керування технологічними об'єктами з нелінійною динамікою [9–11].

У статті ANFIS застосовано як надбудову верхнього рівня системи керування розпилювальною сушаркою для формування корекцій завдань температури вхідного повітря та витрати сушильного агента. Корекції визначаються на основі температури

вихідних газів, вологості продукту та абсолютної вологості вхідного сушильного агента, що дає змогу узгодити роботу локальних контурів за наявності перехресних зв'язків і збурень без ускладнення структури ПІД-регулювання.

Метою роботи є розроблення гібридної системи керування розпилювальною сушаркою, що поєднує локальні ПІД-регулятори з ANFIS-коректором завдань. Проведення порівняння роботи класичної системи на ПІД-регуляторах та системи з ANFIS-коректором за результатами моделювання шляхом аналізу впливу ANFIS-корекції завдань на показники якості регулювання вологості продукту для заданих сценаріїв збурень. Закон ПІД-регулювання для локальних контурів наведено у формулі (1).

$$u(t) = K_P e(t) + \frac{1}{T_I} \int_0^t e(t) dt + T_D \frac{de(t)}{dt}, \quad (1)$$

де $u(t)$ – керуючий вплив, e – значення розузгодження, t – час, K_P , T_I , T_D – коефіцієнти пропорційної, інтегральної та диференційної складових.

Об'єкт керування та структура системи. Технологічну схему процесу подано на рисунку 1. Екстракт отриманий у блоках екстракції БЕк, подають у змішувач для підвищення концентрації органічних речовин. Додавання сухого екстракту дозволяє з бункеру БСЕК, дозволяє виключити вплив нестабільної концентрації на процес висушування. Готову рідину розпилюють в атомайзері за рахунок тиску, що створює насос НЕ.

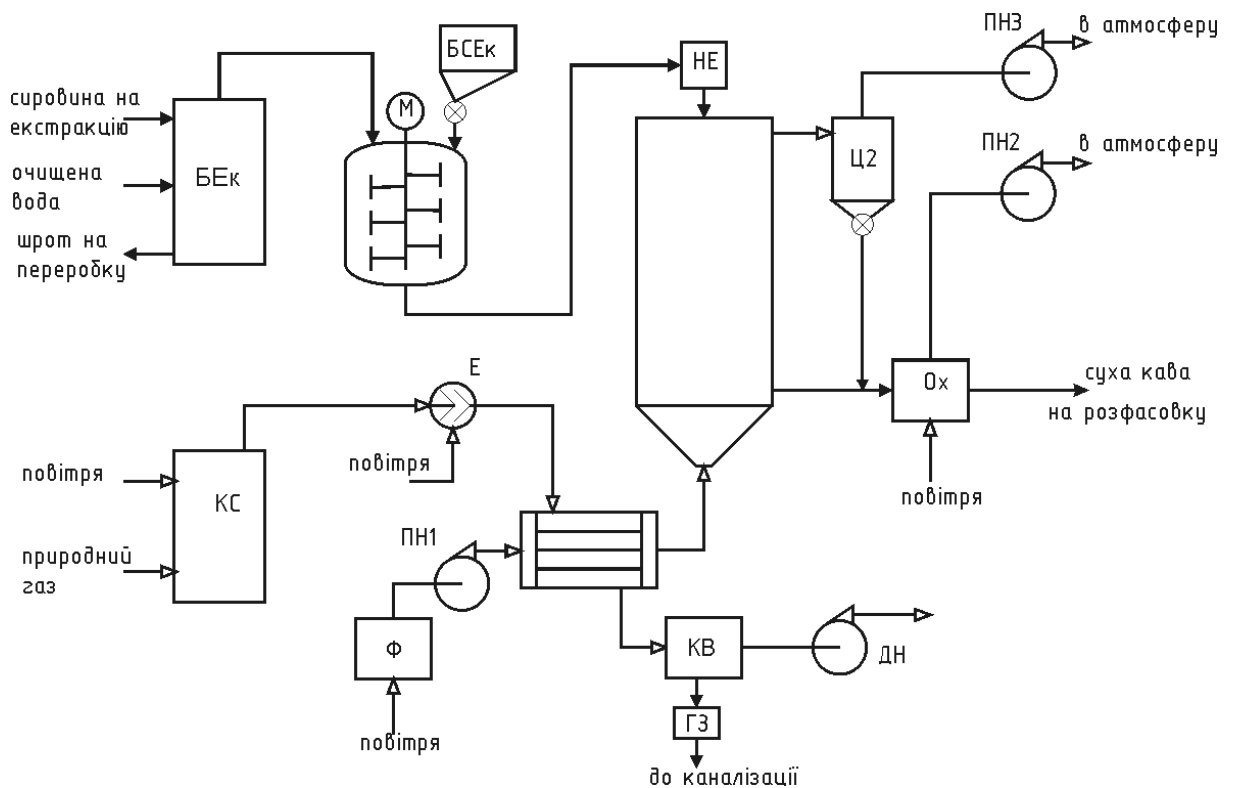


Рисунок 1 – Технологічна схема отримання сухого екстракту

Для підготовки сушильного агента використовують систему нагрівання за рахунок спалювання природного газу в камері спалювання КС. Максимальна температура димових газів підтримується на рівні 350–400 °С. Величина температури повинна бути на 50 °С вище максимальної температури сушильного агента. Кінцеву температуру вхідного сушильного агента підтримують додаванням холодного повітря в димовий газ перед подаванням його у калорифер. Таким чином відбувається теплообмін між сушильним агентом – попередньо фільтрованим атмосферним повітрям та теплоносієм – димовим газом від камери спалювання. Розрідження в димовому каналі підтримується димовим насосом ДН. Повітря через фільтр нагнітається насосом ПН1 у калорифер. Після калориферу сушильний агент подають у сушильну камеру. На рисунку її показано узагальнено, так як реальні конструкції відрізняються одна від одної. Вихідний зволожений сушильний агент видаляється насосом ПН3 через циклон Ц2. В реальних установках перед насосом встановлюють тканинні фільтри. Отриманий сухий екстракт через охолоджувач Ох направляють на фасовку.

Основним параметром при отриманні сипких розчинних екстрактів є вологість готового продукту. Процес висушування лімітується органолептичними показниками та фізико-хімічними перетвореннями. Зокрема, підвищення інтенсивності процесу можливе за рахунок підвищення температури сушильного агента та його витрати. Але це приводить до зниження смакових якостей через окиснення продукту та його збіднення ароматичними речовинами [12]. Також підвищення витрати сушильного агента може приводити до зриву аеродинамічного режиму роботи обладнання і збільшення виносу екстракту з вихідним сушильним агентом. Через це намагаються підтримувати номінальну вологість при мінімальній температурі сушильного агента. Ще одним небезпечним елементом є самозаймання сухого екстракту при перевищенні температури більше 280 °С.

У цій роботі досліджено систему керування розпилювальною сушаркою, призначену для підтримання заданих значень вологості готового продукту та температури вихідних газів. Такі системи побудовані на ПІД-регуляторах є класичними для технологічних ліній, що випускаються. Базова структура містить два локальні контури з ПІД-регуляторами. У моделі керуючими впливами є температура вхідного сушильного агента T_{in} (регулятор RC2) та витрата сушильного агента F_{in} (регулятор RC1). Запропонована система керування не потребує вносити зміни у обладнання чи апаратну частину системи керування, що вже існує. ANFIS представляє собою програмну частину, яка формує корекції завдань для локальних регуляторів у вигляді додаткових приростів до заданих значень температури та витрати. Узагальнену структуру гібридної системи подано на рисунку 2.

Побудова моделі та підготовка даних для ANFIS. Ідентифікацію об'єкта виконано на підставі аналізу даних з літературних джерел [2, 3, 13–16]. Спочатку було виявлено загальні тенденції:

- вхідна температура сушильного агента, T_{in} . Зворотна залежність із MC – при зростанні з 150 °С до 240 °С MC знижується на 35–50 %;
- витрата повітря, F_{in} . Слабка зворотна залежність – збільшення витрати на 20 % знижує MC на 3–8 %;
- вологість повітря (AH_{in}): Пряма залежність – збільшення AH_{in} з 1 до 5 г/кг підвищує MC на 5–15 %.

Шляхом попередніх розрахунків літературні дані було приведено до спільних діапазонів:

- температура 180–240 °С;
- витрати сушильного агента 500–650 кг/год;
- вологість сушильного агента на вході 1–5 г/кг.

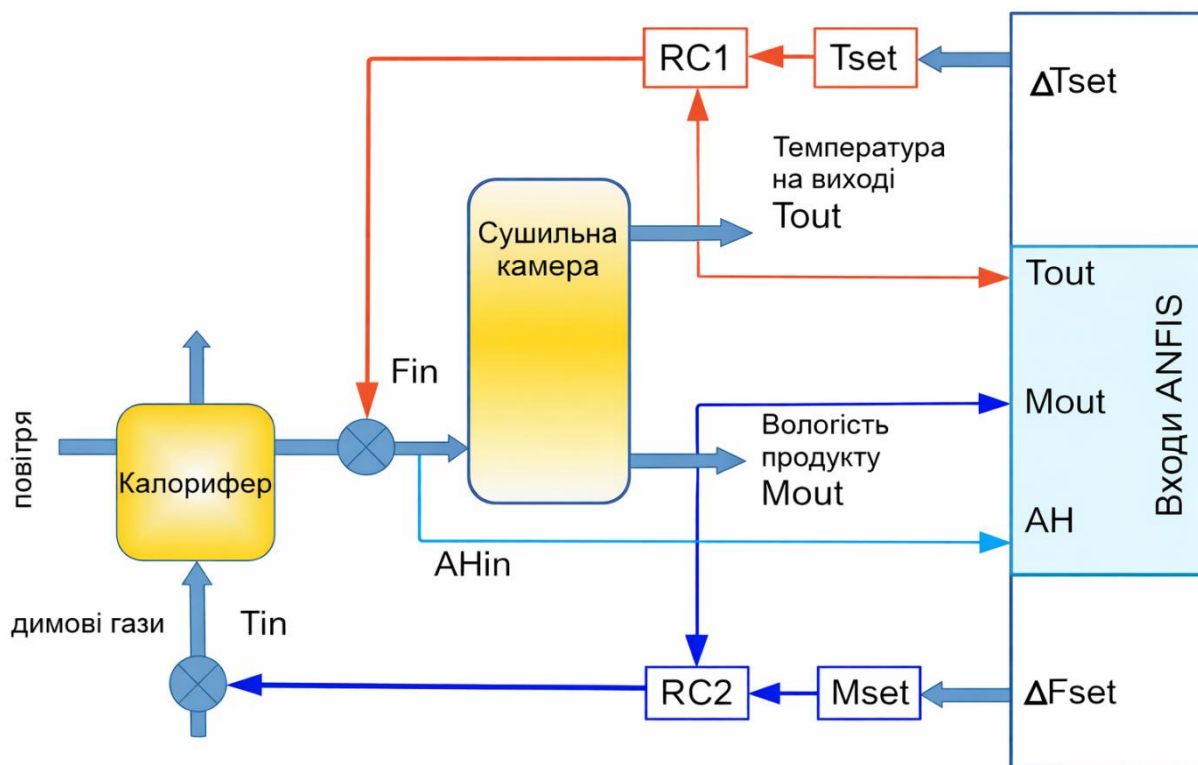


Рисунок 2 – Структура гібридної системи керування

На підставі статичних залежностей було розраховано коефіцієнти підсилення каналів та параметри передавальних функцій з урахуванням обраної робочої області. Після цього динаміку каналів апроксимовано передавальними функціями із запізнюванням у середовищі MATLAB/Simulink. Адекватність моделі оцінювали шляхом порівняння розрахованих вихідних значень з даними з літературних джерел з поетапним коригуванням параметрів до досягнення середньої абсолютної похибки 3 %.

Приклад реалізації моделі сушильної камери у середовищі MATLAB/Simulink наведено на рисунку 3. Передатні функції відповідають зв'язкам між вхідними та вихідними параметрами:

- « T_{in_Tout} » визначає вплив вхідної температури сушильного агента на його вихідну температуру;
- « F_{in_Tout} » визначає вплив витрати сушильного агента на його вихідну температуру;
- « AH_Tout » визначає вплив вхідної вологості сушильного агента на його вихідну температуру;
- « T_{in_MC} » визначає вплив вхідної температури сушильного агента на вологість сухого екстракту;
- « F_{in_MC} » визначає вплив витрати сушильного агента на вологість сухого екстракту;
- « AH_MC » визначає вплив вхідної вологості сушильного агента на вологість сухого екстракту.

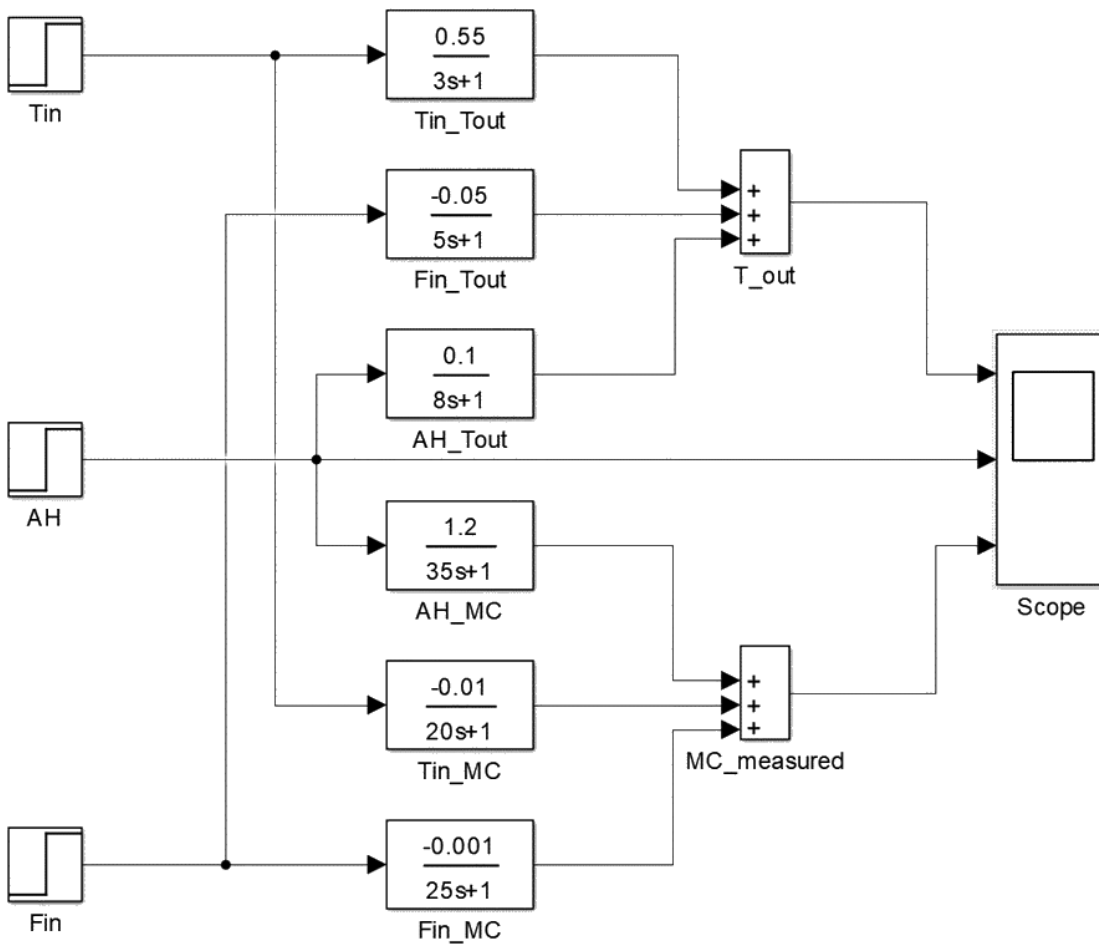


Рисунок 3 – Simulink-модель сушильної камери

Отриману модель було використано для генерації навчальних даних ANFIS. Вибірка сформована як набір пар «вхідні змінні, вихідні дії», де вхідними змінними є температура вихідного сушильного агента, вологість продукту та абсолютна вологість вхідного сушильного агента, а вихідними є корекції завдань температури і витрати вхідного сушильного агента. Під час генерації даних варіювали сценарії збурень, зокрема зміну абсолютної вологості вхідного сушильного агента, щоб охопити типові режими роботи.

Як вхідні змінні ANFIS використано температуру сушильного агента на виході з сушильної камери T_{out} , вологість продукту MC та абсолютну вологість вхідного повітря AH_{in} :

$$x = \begin{bmatrix} x1 \\ x2 \\ x3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{out} \\ MC \\ AH_{in} \end{bmatrix}. \tag{2}$$

Як вихідні змінні – корекції завдань температури та витрати:

$$\Delta T_{\text{set}}, \Delta F_{\text{set}}. \quad (3)$$

Загальна кількість правил у кожній ANFIS моделі становить 27, що відповідає повній комбінації трьох вхідних змінних із трьома функціями належності для кожної змінної, тобто 3^3 . У якості функцій належності обрано трикутні.

Загальна структура правил:

$$\begin{aligned}
 &R_i : \\
 &\text{IF } T_{\text{set}} \in A_1^1 \\
 &\quad \text{AND } MC_{\text{set}} \in A_1^2 \\
 &\quad \text{AND } AH_{\text{in}} \in A_1^3 \\
 &\text{THEN} \\
 &y_i = a_i \cdot T_{\text{set}} + b_i \cdot MC_{\text{set}} + c_i \cdot AH_{\text{in}} + d_i,
 \end{aligned} \quad (4)$$

де A_1^k – нечіткі множини; a_i, b_i, c_i, d_i – параметри лінійної частини правила, що визначаються у процесі навчання ANFIS.

Ступінь активації i -го правила:

$$w_i = \mu_{A_1^1}(T_{\text{set}}) \cdot \mu_{A_1^2}(MC_{\text{set}}) \cdot \mu_{A_1^3}(AH_{\text{in}}). \quad (5)$$

Нормалізація коефіцієнтів активації:

$$\bar{w}_i = \frac{w_i}{\sum_{j=1}^N w_j} \quad (6)$$

Підсумковий вихід ANFIS-мережі визначається як зважена сума виходів усіх правил:

$$y = \sum_{i=1}^N \bar{w}_i \cdot (a_i \cdot T_{\text{set}} + b_i \cdot MC_{\text{set}} + c_i \cdot AH_{\text{in}} + d_i). \quad (7)$$

Реалізація ANFIS-корекції у Simulink. Реалізацію коректора виконано у вигляді MATLAB Function-блоку, який на кожному кроці моделювання нормалізує вхідні параметри, обчислює нечіткий вивід і формує вихідні корекції. Для врахування обмежень виконавчих механізмів передбачено насичення виходів коректора та формування скоригованих завдань для локальних контурів. Загальну Simulink-модель з ANFIS-коректором наведено на рисунку 4. Модуль Subsystem – містить функціональний блок ANFIS-коректора.

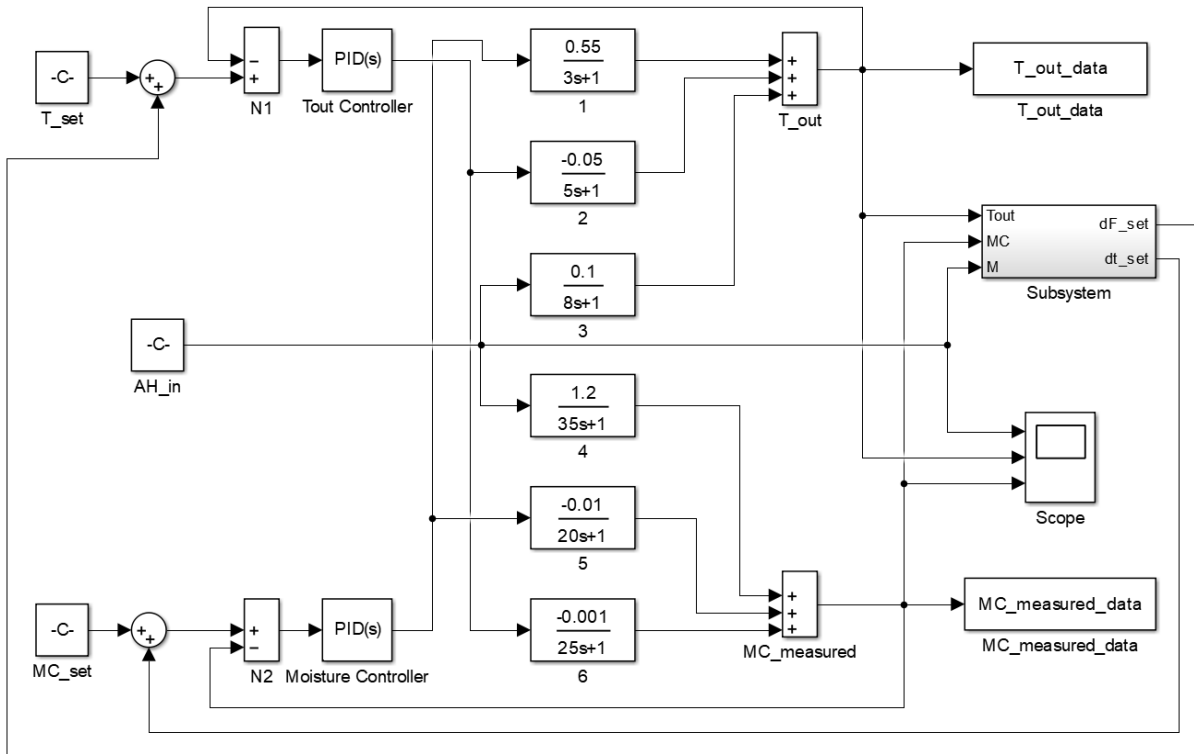


Рисунок 4 – Simulink-модель гібридної системи

Результати порівняльного моделювання. Ефективність гібридного підходу оцінено шляхом порівняння перехідних процесів у класичній схемі з ПІД-регуляторами та у схемі з ANFIS-корекцією. Для інтегральної оцінки якості використано критерій I-?E, поданий у формулі (8).

$$J_{ISE} = \int_0^{\infty} [e(t)]^2 dt, \tag{8}$$

де $e(t) = y_{set}(t) - y(t)$ – помилка керування, різниця між заданим значенням та фактичним вихідним значенням.

У базовому сценарії змінювали завдання вологості з 3 % до 2,5 %. В результаті гібридна система показала зменшення часу регулювання з 180 до 120 с, зниження пере-регулювання з 14 % до 5 % та зменшення критерію ISE з 1,00 до 0,52. Порівняння параметрів роботи гібридної та класичної систем керування при різних сценаріях подано у таблиці 1. Запропонована гібридна система має кращі показники регулювання особливо у діапазонах, що виходять за межі номінальних робочих режимів. Такі режими характерні при запусках та зупинках технологічної схеми та використанні сировини, що вимагає низьких температур висушування. Класична система регулювання в таких умовах має високу коливність процесу (декремент загасання $\psi < 0.2$) через перехресні впливи та потребує окремого переналаштування. На відміну від неї, гібридна система регулювання зберігає аперіодичність (декремент загасання $\psi = 0$) при низьких відхиленнях та часі регулювання.

Таблиця 1 – Порівняння параметрів роботи ANFIS та ПІД систем керування

Параметр збурення	Діапазон зміни	Перерегулювання за вологістю продукту, %		Час регулювання, с		Максимальне відхилення $\Delta T_{out_max}, ^\circ C$	
		ПІД	ANFIS	ПІД	ANFIS	ПІД	ANFIS
Зміна завдання вологості, MC_{set}	Від 3% до 2.5%	12	5	180	120	$> 4,0^\circ C$	$< 1,5^\circ C$
Абсолютна вологість вхідного повітря, AN_{in}	Від 5 до 8 г/кг	0,4	0,15	250	150	$> 3^\circ C$	$< 1,5^\circ C$
Зміна завдання вологості MC_{set} , (діапазон T_{set} 75 – 100 $^\circ C$)	Від 3% до 2.5%	14	5	220	120	$> 4,0^\circ C$	$< 1,5^\circ C$

Обговорення. Поліпшення показників регулювання пояснюється тим, що ANFIS реалізує нелінійне перетворення інформації про стан процесу та збурення, зокрема про абсолютну вологість вхідного сушильного агента, у корекції завдань локальних контурів. Це дає змогу компенсувати частину перехресних зв'язків: за однакових цільових значень температури вихідного сушильного агента і вологості продукту верхній рівень змінює завдань температури вхідного сушильного агента та витрати сушильного агента так, щоб зменшити взаємний вплив каналів. Отримані результати підтверджують перспективність нейро-нечітких методів у задачах координації контурів регулювання, особливо для об'єктів із запізнюваннями. Водночас наведені показники отримано в середовищі MATLAB/Simulink із використанням синтетичних навчальних вибірок, тому для промислового впровадження необхідне донавчання моделі на реальних даних. Окремої перевірки потребує робота алгоритму за наявності шумів вимірювання температури вихідних газів, вологості продукту та похибок оцінювання абсолютної вологості вхідного сушильного агента. Практична реалізація повинна враховувати обмеження виконавчих механізмів, передбачати насичення корекцій і режим безпечного переходу до класичного ПІД-регулювання у разі відмови верхнього рівня.

Висновки. Запропоновано гібридну структуру системи керування вологістю сухого екстракту при розпилювальному висушуванні на основі поєднання локального ПІД-регулювання та ANFIS-корекції завдань. За результатами порівняльного моделювання встановлено зменшення часу регулювання та перерегулювання гібридної системи у порівнянні із системою на ПІД-регуляторах без коректорів а також зменшення відхилень вологості продукту під дією збурень. Збурення вносились і як зміна завдання вологості по висушеному екстракту так і як зміна абсолютної вологості вхідного сушильного агента. Моделювання проводилось для нормального режиму висушування і для випадків знижених температур вихідного сушильного агента. Подальші дослідження доцільно спрямувати на апробацію алгоритму на реальному обладнанні та використання експериментальних даних для уточнення параметрів ANFIS і перевірки стійкості алгоритму до збурень і невизначеності параметрів. Окремим напрямом є аналіз впливу складу вхідних змінних ANFIS на показники якості керування, зокрема для наборів «витрата сушильного агента, абсолютна вологість вхідного сушильного агента, вологість продукту» та «витрата сушильного агента, абсолютна вологість вхідного сушильного агента, витрата екстракту, концентрація екстракту».

Література

1. Ozmen L., Langrish T. A. G. A study of the limitations to spray dryer outlet performance. *Drying Technology*. 2003. Vol. 21, No. 5. P. 895–917. DOI: <https://doi.org/10.1081/DRT-120021691>.

2. Schuck P., Dolivet A., Méjean S., Jeantet R. Relative humidity of outlet air: the key parameter to optimize moisture content and water activity of dairy powders. *Dairy Science and Technology*. 2008. Vol. 88, No. 1. P. 45–52. DOI: <https://doi.org/10.1051/dst:2007007>.
3. Ohtani S., Matsuda I., Hasegawa T. Low-temperature spray drying for aroma retention. *Food Science and Technology Research*. 1995. Vol. 1, No. 2. P. 105–111.
4. Domínguez-Niño N. A., Cantú-Lozano D., Ragazzo-Sánchez J. A., Andrade-González I., Luna-Solano G. Energy requirements and production cost of the spray drying process of cheese whey. *Drying Technology*. 2018. Vol. 36, No. 5. P. 597–608. DOI: <https://doi.org/10.1080/07373937.2017.1350863>.
5. Shabde V. S., Hoo K. A. Optimum controller design for a spray drying process. *Control Engineering Practice*. 2008. Vol. 16, No. 5. P. 541–552. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2007.06.004>.
6. Petersen L. N., Poulsen N. K., Niemann H. H., Utzen C., Jørgensen J. B. Comparison of three control strategies for optimization of spray dryer operation. *Journal of Process Control*. 2017. Vol. 57. P. 1–14. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jprocont.2017.05.008>.
7. Poozesh S., Karam M., Akafuah N., Wang Y. Integrating a model predictive control into a spray dryer simulator for a closed-loop control strategy. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2021. Vol. 170. P. 121010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121010>.
8. Takagi T., Sugeno M. Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*. 1985. Vol. SMC-15, No. 1. P. 116–132. DOI: <https://doi.org/10.1109/TSMC.1985.6313399>.
9. Zubkova K., Sherstjuk V. Neuro-fuzzy control of spray drying food machine. *CEUR Workshop Proceedings*. 2023. Vol. 3373. URL: <https://ceur-ws.org/Vol-3373/paper4.pdf>
10. Jang J. S. R. ANFIS: adaptive-network-based fuzzy inference system. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*. 1993. Vol. 23, No. 3. P. 665–685. DOI: <https://doi.org/10.1109/21.256541>.
11. MathWorks. Fuzzy Logic Toolbox User's Guide. MATLAB Documentation. 2023. URL: <https://www.mathworks.com/help/fuzzy/>
12. Ягелюк С. В., Артюх Т. Н., Данильчук А. М. Забезпечення якості розчинної кави. *Товарознавчий вісник*. 2023. № 1 (16). С. 224–234. DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2310-5283-2023-17-18/104>.
13. Villegas-Santiago J., Rodríguez-Hernández G., Hernández-Sánchez H. Spray drying of coffee: process optimization and product quality. *Food and Bioprocess Technology*. 2020. Vol. 13, No. 2. P. 265–275.
14. Schuck P., Dolivet A., Jeantet R. Advances in spray-drying of dairy products. *Journal of Food Engineering*. 2005. Vol. 68, No. 3. P. 305–312.
15. Wahyu Karyadi M., Pangestu R., Wijayanti R. Effect of feed concentration and inlet temperature on spray drying performance. *International Journal of Food Science*. 2020. Vol. 2020. P. 1–8.
16. Corrêa J. L. G., de Andrade R. S., Peixoto M. F. Spray drying of coffee leaf extract: influence of process conditions on powder properties. *Journal of Food Processing and Preservation*. 2016. Vol. 40, No. 5. P. 934–942.

Bibliography (transliterated)

1. Ozmen L., Langrish T. A. G. A study of the limitations to spray dryer outlet performance. *Drying Technology*. 2003. Vol. 21, No. 5. P. 895–917. DOI: <https://doi.org/10.1081/DRT-120021691>.

2. Schuck P., Dolivet A., Méjean S., Jeantet R. Relative humidity of outlet air: the key parameter to optimize moisture content and water activity of dairy powders. *Dairy Science and Technology*. 2008. Vol. 88, No. 1. P. 45–52. DOI: <https://doi.org/10.1051/dst:2007007>.
3. Ohtani S., Matsuda I., Hasegawa T. Low-temperature spray drying for aroma retention. *Food Science and Technology Research*. 1995. Vol. 1, No. 2. P. 105–111.
4. Domínguez-Niño N. A., Cantú-Lozano D., Ragazzo-Sánchez J. A., Andrade-González I., Luna-Solano G. Energy requirements and production cost of the spray drying process of cheese whey. *Drying Technology*. 2018. Vol. 36, No. 5. P. 597–608. DOI: <https://doi.org/10.1080/07373937.2017.1350863>.
5. Shabde V. S., Hoo K. A. Optimum controller design for a spray drying process. *Control Engineering Practice*. 2008. Vol. 16, No. 5. P. 541–552. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2007.06.004>.
6. Petersen L. N., Poulsen N. K., Niemann H. H., Utzen C., Jørgensen J. B. Comparison of three control strategies for optimization of spray dryer operation. *Journal of Process Control*. 2017. Vol. 57. P. 1–14. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jprocont.2017.05.008>.
7. Poozesh S., Karam M., Akafuah N., Wang Y. Integrating a model predictive control into a spray dryer simulator for a closed-loop control strategy. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2021. Vol. 170. P. 121010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121010>.
8. Takagi T., Sugeno M. Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*. 1985. Vol. SMC-15, No. 1. P. 116–132. DOI: <https://doi.org/10.1109/TSMC.1985.6313399>.
9. Zubkova K., Sherstjuk V. Neuro-fuzzy control of spray drying food machine. *CEUR Workshop Proceedings*. 2023. Vol. 3373. URL: <https://ceur-ws.org/Vol-3373/paper4.pdf>
10. Jang J. S. R. ANFIS: adaptive-network-based fuzzy inference system. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*. 1993. Vol. 23, No. 3. P. 665–685. DOI: <https://doi.org/10.1109/21.256541>.
11. MathWorks. Fuzzy Logic Toolbox User's Guide. MATLAB Documentation. 2023. URL: <https://www.mathworks.com/help/fuzzy/>
12. Iaheliuk S. V., Artiukh T. N., Danylchuk A. M. Zabezpechennia yakosti rozchynnoi kavy. *Tovaroznavchyi visnyk*. 2023. No. 1 (16). P. 224–234. DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2310-5283-2023-17-18/104>.
13. Villegas-Santiago J., Rodríguez-Hernández G., Hernández-Sánchez H. Spray drying of coffee: process optimization and product quality. *Food and Bioprocess Technology*. 2020. Vol. 13, No. 2. P. 265–275.
14. Schuck P., Dolivet A., Jeantet R. Advances in spray-drying of dairy products. *Journal of Food Engineering*. 2005. Vol. 68, No. 3. P. 305–312.
15. Wahyu Karyadi M., Pangestu R., Wijayanti R. Effect of feed concentration and inlet temperature on spray drying performance. *International Journal of Food Science*. 2020. Vol. 2020. P. 1–8.
16. Corrêa J. L. G., de Andrade R. S., Peixoto M. F. Spray drying of coffee leaf extract: influence of process conditions on powder properties. *Journal of Food Processing and Preservation*. 2016. Vol. 40, No. 5. P. 934–942.

УДК 66.047:681.5:004.8

О. В. Пугановський, ст. викладач, І. Л. Красніков, канд. техн. наук, доцент,
В. О. Лобойко, канд. техн. наук, доцент

ГІБРИДНА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ РОЗПИЛЮВАЛЬНИМ СУШІННЯМ ЕКСТРАКТУ З НЕЙРО-НЕЧІТКОЮ КОРЕКЦІЄЮ ЗАВДАНЬ

У статті запропоновано гібридну систему керування розпилювальною сушаркою екстракту, орієнтовану на підвищення точності стабілізації вологості сухого продукту за наявності перехресних зв'язків між контурами та зовнішніх збурень, що зумовлені зміною властивостей сировини й параметрів повітряного середовища. Базова структура керування зберігає типову для промислових установок реалізацію локальних контурів на ПІД-регуляторах, а координація взаємодіючих контурів здійснюється верхнім рівнем у вигляді ANFIS-коректора уставок. Коректор формує додаткові прирости до уставок температури вхідного сушильного агента та його витрати, використовуючи поточні значення температури вихідних газів, вологості продукту та абсолютної вологості вхідного повітря. Така побудова дозволяє компенсувати частину взаємних впливів каналів, не змінюючи структуру локального ПІД-регулювання і не потребуючи модифікації апаратної частини системи.

Математичну модель об'єкта побудовано в середовищі MATLAB/Simulink шляхом ідентифікації каналів за статичними залежностями та динамічними реакціями у вибраній робочій області з подальшою апроксимацією передавальними функціями із запізненням. Адекватність моделі підтверджено зіставленням вихідних змінних моделювання з опублікованими експериментальними даними з відкритих джерел та ітеративним уточненням параметрів передавальних функцій до досягнення середньої відносної похибки 3%. Оскільки експериментальні дані з реальної установки для навчання нейро-нечіткої моделі були відсутні, навчання ANFIS виконано на навчальних вибірках, сформованих у середовищі моделювання на основі отриманої математичної моделі, статичних залежностей і серії імітаційних прогонів.

Ефективність запропонованого підходу оцінено шляхом порівняльного моделювання класичної системи на ПІД-регуляторах і гібридної системи з ANFIS-корекцією уставок. Як показники якості використано перерегулювання, час регулювання та інтегральний критерій ISE у базовому сценарії. Встановлено, що застосування ANFIS-коректора забезпечує зменшення часу регулювання на 33 % (зі 180 до 120 с), зниження перерегулювання у 2,4 раза (з 12 % до 5 %) та зменшення значення критерію ISE на 48 % (з 1,00 до 0,52) порівняно з системою на ПІД-регуляторах. Подальші дослідження доцільно спрямувати на апробацію алгоритму на реальному обладнанні, донавчання ANFIS на експериментальних даних і перевірку роботи верхнього рівня за наявності вимірювальних шумів та обмежень виконавчих механізмів.

Ключові слова: розпилювальне сушіння, нейро-нечітка мережа, ANFIS, ПІД-регулятор, корекція завдань, MATLAB/Simulink.

O. V. Puhanovskyi, I. L. Krasnikov, V. O. Loboiko

HYBRID CONTROL SYSTEM FOR SPRAY DRYING OF EXTRACT WITH NEURO-FUZZY CORRECTION OF SETPOINTS

This paper proposes a hybrid control system for spray drying of extract, aimed at improving the accuracy of moisture stabilization of the dried product in the presence of cross-

couplings between control loops and external disturbances caused by variations in raw material properties and air environment parameters. The basic control structure preserves the conventional industrial implementation of local PID control loops, while the coordination of interacting loops is performed at a supervisory level in the form of an ANFIS-based setpoint corrector. The corrector generates incremental adjustments to the setpoints of the inlet drying-agent temperature and its flow rate based on the current values of outlet gas temperature, product moisture content, and absolute humidity of the inlet air. This architecture enables partial compensation of mutual interactions between process channels without altering the structure of local PID control or requiring modifications to the hardware configuration of the system.

The mathematical model of the process was developed in the MATLAB/Simulink environment by identifying individual channels using static characteristics and dynamic responses within a selected operating range, followed by approximation with transfer functions including dead time. Model adequacy was confirmed by comparing simulated output variables with published experimental data from open sources and by iterative refinement of transfer-function parameters until a mean relative error of 3% was achieved. Since experimental data from an actual industrial installation were unavailable for training the neuro-fuzzy model, ANFIS training was performed using training datasets generated in the simulation environment based on the developed mathematical model, static dependencies, and a series of simulation runs.

The effectiveness of the proposed approach was evaluated through comparative simulation of a conventional PID-based control system and a hybrid system with ANFIS-based setpoint correction. Performance indicators included overshoot, settling time, and the integral squared error (ISE) criterion under a baseline operating scenario. It was established that the application of the ANFIS corrector reduces the settling time by 33 % (from 180 to 120 s), decreases overshoot by a factor of 2.4 (from 12 % to 5 %), and lowers the ISE value by 48 % (from 1.00 to 0.52) compared with the PID-only control system. Further research should focus on experimental validation of the proposed algorithm on real equipment, additional training of the ANFIS model using experimental data, and assessment of the supervisory control layer performance in the presence of measurement noise and actuator constraints.

Keywords: spray drying, neuro-fuzzy network, ANFIS, PID controller, setpoint correction, MATLAB/Simulink.

Отримано редколегією 13.01.2026

Пугановський Олег Валентинович (Oleh Puhanovskyi), ст. викладач Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”, <https://orcid.org/0009-0001-9044-5956>;

Красніков Ігор Леонідович (Igor Krasnikov), канд. техн. наук, доцент, зав. каф. Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”, <https://orcid.org/0000-0002-7663-1816>;

Лобойко Вячеслав Олексійович (Viacheslav Loboiko), канд. техн. наук, доцент, доцент Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”, <https://orcid.org/0000-0003-2939-7139>.