

DOI 10.15589/jnn20170404

УДК 681.5
К59

SYNTHESIS AND OPTIMIZATION OF FUZZY CONTROLLERS IN THE CONTROL SYSTEMS OF PYROLYSIS REACTORS

СИНТЕЗ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ НЕЧІТКИХ РЕГУЛЯТОРІВ У СИСТЕМАХ КЕРУВАННЯ ПІРОЛІЗНИМИ РЕАКТОРАМИ

Oleksiy V. Kozlov

oleksiy.kozlov@nuos.edu.ua

ORCID: 0000-0003-2069-5578

Galyna V. Kondratenko

galvlad09@rambler.ru

ORCID: 0000-0002-8446-5096

Yuriy P. Kondratenko

y_kondrat2002@yahoo.com

ORCID: 0000-0001-7736-883X

О. В. Козлов,

канд. техн. наук, доц.

Г. В. Кондратенко,

канд. техн. наук, доц.

Ю. П. Кондратенко,

д-р. техн. наук, проф.

Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв

Abstract. The article presents a development of the complex methodology of synthesis and optimization of Mamdani fuzzy controllers (FC) for automatic control systems (ACS) for temperature modes of the reactors of specialized pyrolysis complexes (SPC). The proposed complex methodology allows performing preliminary synthesis of the structure and parameters of the Mamdani FCs for the ACSs regulating the temperature modes of the SPC reactors on the basis of expert evaluations, as well as further sequential procedures for optimizing the parameters and rule-base structure of the given FCs with mathematical programming methods. To study the effectiveness of the developed methodology, this paper considers the design of the FC for the ACS of the temperature of the experimental SPC reactor. Application of the FCs developed on the basis of the given methodology in the ACSs under study allows providing sufficient level of control indicators when using relatively simple hardware and software.

Keywords: fuzzy controller; automatic control system; optimization; pyrolysis reactor.

Анотація. Запропоновано комплексну методику синтезу та оптимізації нечітких регуляторів (НР) типу Мамдані для систем автоматичного керування (САК) температурними режимами реакторів спеціалізованих піролізних комплексів (СПК). Для дослідження ефективності розробленої методики проведено проектування НР для САК температурою реактора експериментального СПК. Доведено, що застосування створених на основі представленої методики НР в САК температурними режимами піролізних реакторів СПК дозволяє забезпечувати достатньо високі показники якості керування за їхньої відносно нескладної програмно-апаратної реалізації.

Ключові слова: нечіткий регулятор; система автоматичного керування; оптимізація; піролізний реактор.

Аннотация. Предложена комплексная методика синтеза и оптимизации нечетких регуляторов (НР) типа Мамдани для систем автоматического управления (САУ) температурными режимами реакторов специализированных пиролизных комплексов (СПК). Для исследования эффективности разработанной методики проведено проектирование НР для САУ температурой реактора экспериментального СПК. Доказано, что применение созданных на основе данной методики НР в САУ температурными режимами пиролизных реакторов СПК позволяет обеспечивать достаточно высокие показатели качества управления при относительно несложной их программно-аппаратной реализации.

Ключевые слова: нечеткий регулятор; система автоматического управления; оптимизация; пиролизный реактор.

REFERENCES

- [1] Ryzhkov S. S., Markina L. M. *Eksperymentalni doslidzhennia utylizatsii orhanichnykh vidkhodiv metodom bahatokonturnoho tsyrkuliatsiinoho pirolizu* [Experimental research on the organic waste recovery with the method of multi-circuit circulation pyrolysis]. *Zbirnyk naukovykh prats NUK — Collection of scientific publications of NUOS*, 2007, no. 5, pp. 100–106.
- [2] Rotshteyn A. P. *Intellektualnye tekhnologii identifikatsii: nechetkie mnozhestva, geneticheskie algoritmy, neyronnye seti* [Intelligent identification technologies: fuzzy sets, genetic algorithms, neural networks]. Vinnitsa, UNIVYERSUM-Vinnitsya Publ., 1999. 300 p.
- [3] Rutkovskaya D., Pilinskiy M., Rutkovskiy L. *Neyronnye seti, geneticheskie algoritmy i nechetkie sistemy* [Neural networks, genetic algorithms and fuzzy systems]. Moscow, Goryachaya liniya — Telekom Publ., 2006. 452 p.
- [4] Barreto A. M. S., Anderson C. W. Restricted Gradient-Descent Algorithm for Value-Function Approximation in Reinforcement Learning. *Artificial Intelligence*, 2008, no. 172, issues 4–5, pp. 454–482.
- [5] Gacto M. J., Alcalá R., Herrera F. Adaptation and Application of Multi-Objective Evolutionary Algorithms for Rule Reduction and Parameter Tuning of Fuzzy Rule-Based Systems. *Soft Computing*, 2009, no. 5, pp. 419–436.
- [6] Hampel R., Wagenknecht M., Chaker N. *Fuzzy Control: Theory and Practice*. New York, Physika-Verlag Publ., Heidelberg, 2000. 410 p.
- [7] Kondratenko Y. P., Kozlov O. V. Fuzzy Controllers in Reactors Control Systems of Multiloop Pyrolysis Plants. *19th Zittau Fuzzy Colloquium: Proceedings of East-West Fuzzy Colloquium 2012*. Zittau, Hochschule Zittau/Goerlitz Publ., Germany, 2012, pp. 15–22.
- [8] Kondratenko Y., Korobko V., Korobko O., Kondratenko G., Kozlov O. Green-IT Approach to Design and Optimization of Thermoacoustic Waste Heat Utilization Plant Based on Soft Computing. Chapter in a book: “Green IT Engineering: Components, Networks and Systems Implementation”. *Book Series: Studies in Systems, Decision and Control. Vol. 105*. Berlin, Heidelberg, Springer International Publ., 2017, pp. 287–311.
- [9] Kondratenko Y. P., Kozlov O. V. Mathematic Modelling of Reactor’s Temperature Mode of Multiloop Pyrolysis Plant. *Lecture Notes in Business Information Processing: Modelling and Simulation in Engineering, Economics and Management. Vol. 115*. Berlin, Heidelberg, Springer International Publ., 2012, pp. 178–187.
- [10] Kondratenko Y., Simon D. Structural and Parametric Optimization of Fuzzy Control and Decision Making Systems. *World Conference on Soft Computing*. Berkeley, CA, 2016, pp. 1–6.
- [11] Kondratenko Y. P., Klymenko L. P., Al Zu’bi E. Y. M. Structural Optimization of Fuzzy Systems’ Rules Base and Aggregation Models. *Kybernetes*, 2013, vol. 42, issue 5, pp. 831–843.
- [12] Kondratenko Y. P., Kozlov O. V., Korobko O. V., Topalov A. M. Synthesis and Optimization of Fuzzy Control System for Floating Dock’s Docking Operations. Chapter in a book “Fuzzy Control Systems: Design, Analysis and Performance Evaluation”. Wendy Santos (Eds.). New York, USA, Nova Science Publishers, 2017, pp. 141–215.
- [13] Kondratenko Y. P., Altameem T. A., Al Zu’bi E. Y. M. The Optimization of Digital Controllers for Fuzzy Systems Design. *Advances in Modelling and Analysis. AMSE Periodicals*, 2010, series A, vol. 47, issue 1-2, pp. 19–29.
- [14] Simon D. H_∞ Estimation for Fuzzy Membership Function Optimization. *Intern. Journal of Approximate Reasoning*, 2005, no. 40, pp. 224–242.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Автоматизація процесів керування спеціалізованими піролізними комплексами для термічної утилізації полімерних відходів на основі високоефективних САК дозволяє підвищити їхні енергетичні, економічні та експлуатаційні показники, а також забезпечити високу якість отриманого на виході альтернативного палива [1]. Головним завданням автоматизації СПК є стабілізація температурних режимів їх піролізних реакторів в умовах дії різнотипних збурювальних впливів [1, 7]. Саме тому в процесі проектування САК температурними режимами необхідно враховувати, що піролізний реактор СПК являє со-

бою складний об’єкт керування з суттєво нелінійними компонентами й нестационарними параметрами, а значення його температури нагріву може змінюватися під дією апріорно невизначених параметричних і координатних збурень [7]. Керувальний пристрій САК реактором повинен здійснювати компенсацію збурювальних впливів таким чином, щоб забезпечити, по-перше, стабілізацію певного значення температури нагріву реактора, відповідного заданому режиму роботи СПК, а по-друге, достатньо високі показники якості керування.

Аналіз методів, алгоритмів і схемотехнічних рішень для проектування й реалізації САК темпера-

турою нагріву піролізних реакторів СПК показує доцільність використання принципів нечіткого керування, що спираються на теорію нечітких множин і нечітку логіку [2, 3, 6]. Системи керування з НР типу Мамдані й Сугено створюються й успішно застосовуються для керування складними технічними об'єктами, що мають невизначені або нелінійні параметри, в різних технічних галузях [3, 6–8]. Важливою рисою САК на основі НР є те, що вони розробляються переважно з урахуванням експертних оцінок, а їхні показники якості керування суттєво залежать від кваліфікації й досвіду розробника (оператора або фахівця-експерта), а також від ряду суб'єктивних чинників [2, 6]. Зокрема, НР типу Мамдані мають низьку ефективність під час керування об'єктами, для яких немає значного досвіду ручного керування, накопиченого їх операторами [6, 7]. Таким чином, актуальною є проблема розробки дієвих методів, алгоритмів і методик проектування нечітких керувальних пристроїв, які дозволять зменшити вплив суб'єктивних факторів на процес проектування, підвищити в цілому показники якості нечітких САК маловивченими об'єктами, а також розширити коло завдань керування їх ефективного застосування.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ПУБЛІКАЦІЙ

На сьогодні розроблено ряд методів синтезу НР для САК технічними об'єктами різного призначення, які ґрунтуються на використанні експертних оцінок для визначення структури й параметрів [2, 3, 6]. Суб'єктивний чинник при цьому має істотний вплив на процес проектування НР, а прийняття помилкових рішень може знижувати ефективність нечітких САК або їхнє функціонування буде здійснюватися за занижених (з погляду потенційних можливостей НР) показників якості. Так, наприклад, у статті [7] застосування НР типу Мамдані в САК температурою реактора багатоконтурної піролізної установки не покращило результати порівняно з класичним регулятором.

Для зниження негативного впливу суб'єктивних факторів на процес проектування НР і підвищення

ефективності функціонування САК доцільно використовувати формалізовані з математичної точки зору методи й алгоритми синтезу НР, які базуються на певних оптимізаційних процедурах [5, 10–14]. У роботах [4, 13, 14] наведено методи синтезу НР, які передбачають процедури оптимізації параметрів функцій належності лінгвістичних термів (ФНЛТ), їхніх вхідних і вихідних змінних на основі бажаних перехідних процесів САК. У [5, 10, 11] проаналізовано метод проектування НР із застосуванням структурної оптимізації його бази правил (БП), що дозволяє значно зменшити їх кількість в БП НР без погіршення показників якості САК. У роботах [8] і [12] запропоновано комплексні методики синтезу й оптимізації НР типу Мамдані для САК такими складними об'єктами керування, як термоакустична установка й плавучий док. В обох випадках застосування розроблених НР з урахуванням вищенаведених методик, які базуються на процедурах структурної й параметричної оптимізації НР, дозволило відповідним САК досягти достатньо високих показників якості керування. Однак розробка формалізованої з математичної точки зору комплексної методики синтезу й оптимізації НР типу Мамдані для САК температурними режимами піролізних реакторів СПК потребує своєї реалізації.

МЕТОЮ СТАТТІ є створення комплексної методики синтезу й оптимізації НР типу Мамдані для САК температурними режимами піролізних реакторів СПК і дослідження її ефективності.

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Особливості побудови САК температурними режимами піролізних реакторів СПК і контролерів температури. Функціональну структуру узагальненої САК температурними режимами піролізного реактора СПК зображено на рис. 1 [7], де ВРК — верхній рівень керування; ЗП — задавальний пристрій; КТ — контролер температури; СНР — система нагріву реактора СПК; ЗГ — зріджений газ; П — повітря; ЛРВГ, ЛРВП — лінійні регулятори витрати ЗГ і П; ГП — газовий палик СНР реактора; ДТ — датчик температури; T_3, T_p — задане й реальне значення температури нагріву реактора СПК; $u_{зп}, u_{кт}, u_{дт}$ — вихідні сигнали

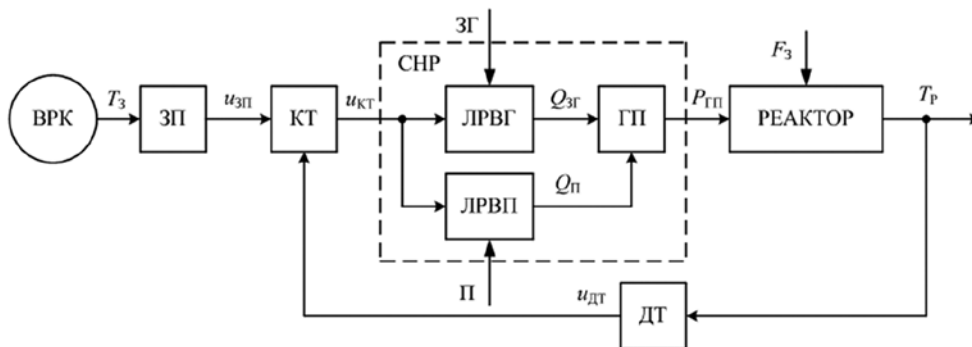


Рис. 1. Функціональна структура узагальненої САК температурними режимами піролізного реактора СПК

ЗП, КТ та ДТ; $Q_{ЗП}$, $Q_{П}$ — значення витрати ЗГ та П; $P_{ГП}$ — значення потужності нагріву ГП СНР; F_3 — збурювальні впливи, що діють на реактор СПК.

КТ містить в собі НР типу Мамдані та певні допоміжні блоки. Структуру КТ показано на рис. 2, де ФП — функціональний перетворювач; БФЗ — блок фазифікації НР; БНЛВ — блок нечіткого логічного виведення; БП — база правил НР; БДФЗ — блок дефазифікації; БМ — блок множення; БО — блок обмеження; $u_{ФП}$ та $u_{НР}$ — вихідні сигнали ФП і НР; $K_{П}$, $K_{Д}$, $K_{І}$ та K_{u} — коефіцієнти пропорційності при вхідних і вихідній змінних НР.

КТ забезпечує керування температурними режимами піролізного реактора СПК на основі прямого й зворотного зв'язку. ФП реалізує залежність $u_{ФП} = f(u_{ЗП}) = f(T_3)$, що відповідає оберненій статичній характеристиці розімкненої системи керування температурою реактора.

Вхідними змінними НР можуть виступати сигнал помилки управління температурою ε_T , його похідна за часом $\frac{d\varepsilon_T}{dt}$ та/або інтеграл за часом $\int \varepsilon_T dt$. Вихідною змінною НР є сигнал $u_{НР}$. Для нормування вхідних сигналів НР і переведення їх у відносні одиниці відповідно до максимальних значень застосовуються коефіцієнти пропорційності $K_{П}$, $K_{Д}$ і $K_{І}$. Для формування сигналу керування КТ $u_{КТ}$ вихідний сигнал НР $u_{НР}$ помножується на вихідний сигнал ФП $u_{ФП}$ за допомогою БМ. Якщо є необхідність його подальшого коригування та обмеження, то береться коефіцієнт пропорційності K_u і БО.

Під час проектування НР типу Мамдані, що входить до складу КТ САК температурними режимами реактора СПК (рис. 2), доцільно використовувати розроблену авторами комплексну методику.

Комплексна методика синтезу та оптимізації НР типу Мамдані для САК температурними режи-

мами піролізних реакторів СПК. На початковому етапі проектування ефективних НР для керування складними технічними об'єктами синтез їх структури та параметрів доцільно здійснювати на основі експертних оцінок і рекомендацій операторів [2, 6]. Після цього для подальшого підвищення показників якості САК необхідно виконати послідовні процедури оптимізації параметрів і структури НР за допомогою відповідних методів математичного програмування [5, 10, 13]. Параметричну оптимізацію НР слід провести з урахуванням бажаних перехідних процесів САК [4, 11, 14], а структурну оптимізацію його БП — згідно з розрахунком впливу кожного правила на процес керування [10]. Застосування такого підходу дозволяє забезпечувати достатньо високі показники якості САК складними технічними об'єктами за відносно нескладної реалізації їх НР.

Запропонована комплексна методика синтезу та оптимізації НР типу Мамдані для САК температурними режимами піролізних реакторів СПК враховує вищенаведені рекомендації й складається з таких кроків.

Крок 1. Вибір вектора вхідних і вихідної змінних НР. На цьому етапі обирається вектор вхідних і вихідної змінних НР температури X , який можна представити таким чином

$$X = \{X_i\}, i = \{1, \dots, n\}, \quad (1)$$

де i — номер вхідної або вихідної змінної НР; n — загальна кількість вхідних і вихідної змінних НР.

Залежно від заданих показників якості керування температурними режимами реактора вектор вхідних і вихідної змінних НР може бути представлено виразами (2), (3) або (4):

$$X = \left\{ \varepsilon_T, \frac{d\varepsilon_T}{dt}, u_{НР} \right\}; \quad (2)$$

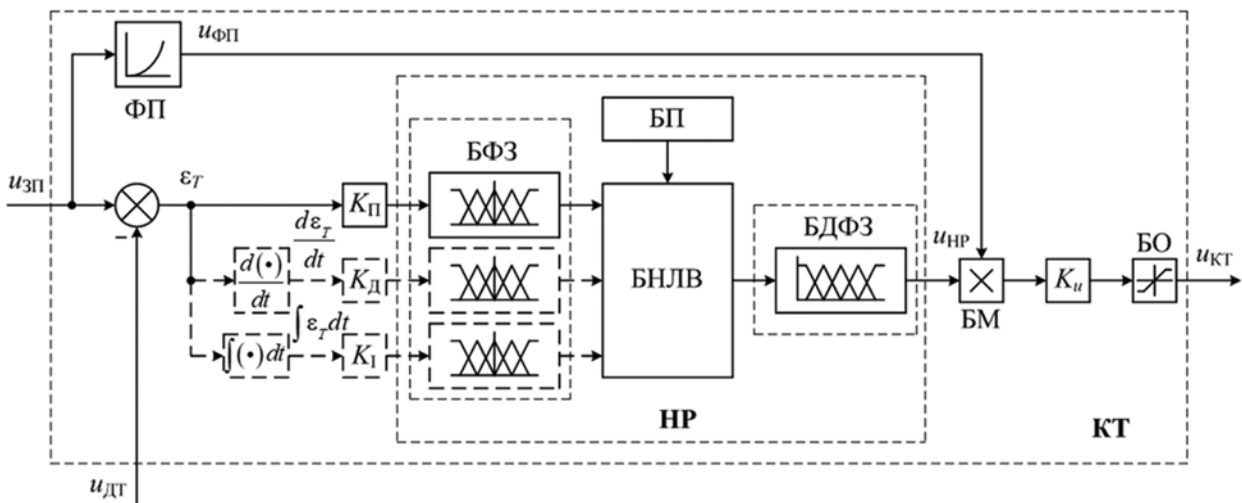


Рис. 2. Функціональна структура КТ

$$\mathbf{X} = \left\{ \varepsilon_T, \int \varepsilon_T dt, u_{HP} \right\}; \quad (3)$$

$$\mathbf{X} = \left\{ \varepsilon_T, \frac{d\varepsilon_T}{dt}, \int \varepsilon_T dt, u_{HP} \right\}. \quad (4)$$

Крок 2. Попереднє визначення вектора коефіцієнтів пропорційності при вхідних і вихідній змінних НР. Передбачається встановлення вектора коефіцієнтів пропорційності \mathbf{K} при вхідних і вихідній змінних НР температури та його попередні значення. Загальний вигляд вектора коефіцієнтів \mathbf{K} є таким:

$$\mathbf{K} = \{K_i\}, i = \{1, \dots, n\}. \quad (5)$$

При $n = 3$ (залежно від обраного на *Кроці 1* вектора \mathbf{X} змінних НР) вектор \mathbf{K} дорівнює:

$$\mathbf{K} = \{K_{II}, K_D, K_u\}; \quad (6)$$

$$\mathbf{K} = \{K_{II}, K_I, K_u\}. \quad (7)$$

У свою чергу, при $n = 4$ вектор коефіцієнтів \mathbf{K} має вигляд

$$\mathbf{K} = \{K_{II}, K_D, K_I, K_u\}. \quad (8)$$

Попередні значення коефіцієнтів пропорційності K_{i0} при вхідних змінних НР X_i ($i = 1, \dots, n - 1$) визначаються на основі їх максимально допустимих значень $X_{i \max}$

$$K_{i0} = \frac{1}{X_{i \max}}, i = \{1, \dots, n - 1\}. \quad (9)$$

Попереднє значення коефіцієнта K_u при вихідній змінній НР u_{HP} на зазначеному етапі доцільно вважати рівним одиниці ($K_{u0} = 1$).

Крок 3. З'ясування робочих діапазонів вхідних і вихідній змінних НР. На цьому етапі встановлюються робочі діапазони, у межах яких можуть змінюватися вхідні і вихідні змінні НР температури \mathbf{X} у процесі його функціонування. Оскільки вхідні змінні X_i ($i = 1, \dots, n - 1$) за попереднього множення на відповідні коефіцієнти K_i ($i = 1, \dots, n - 1$) стосуються входу НР температури у відносних одиницях від максимального значення та можуть мати як додатні, так і від'ємні значення, то їхні робочі діапазони в НР доцільно обирати від -1 до 1 . Значення витрат зрідженого газу $Q_{зг}$ і повітря $Q_{пв}$, а також потужності нагріву $P_{гп}$ газового пальника СНР можуть приймати тільки додатні значення, тому робочий діапазон вихідної змінної НР u_{HP} слід встановлювати від 0 до 2 .

Крок 4. Вибір кількості лінгвістичних термів для вхідних і вихідній змінних НР. На цьому етапі встановлюються значення кількості лінгвістичних термів m_i для кожної i -тої вхідної і вихідній змінної НР температури ($i = 1, \dots, n$). Переважно для вхідних змінних НР САК температурними режимами реактора

значення кількості лінгвістичних термів обираються в діапазоні від 3 до 7 [7], а для вихідній змінній НР — у діапазоні від 5 до 9 .

Крок 5. Окреслення типів ФНЛТ для вхідних і вихідній змінних НР. Виокремлюються типи ФНЛТ для кожної i -тої вхідної й вихідній змінній НР температури. Для вхідних і вихідній змінних НР САК температурними режимами реактора можуть обиратися трикутний, трапецеїдальний, Гаусівський 1-го й 2-го роду, π -подібний типи ФНЛТ та ін. [2].

Крок 6. Попереднє визначення вектора параметрів ФНЛТ вхідних і вихідній змінних НР. Встановлюється вектор \mathbf{P} параметрів (вершин) ФНЛТ вхідних і вихідній змінних НР температури та його попередні значення \mathbf{P}_0 з урахуванням знань експертів або операторів. Вектор параметрів ФНЛТ \mathbf{P} можна подати як:

$$\mathbf{P} = \{P_{j,k}^i\}, i = \{1, \dots, n\}, j = \{1, \dots, m\}, k = \{1, \dots, l\}, \quad (10)$$

де j — номер терму i -тої вхідної або вихідній змінній НР; k — номер параметра (вершини) j -того терму; l — загальна кількість параметрів (вершин) j -того терму. За відсутності експертних знань лінгвістичні терми вхідних і вихідній змінних НР можуть бути рівномірно розподілені на їхніх робочих діапазонах.

Крок 7. Попередній синтез БП НР. На цьому етапі здійснюється попередній синтез БП НР температури на основі вхідних і вихідній змінних \mathbf{X} , а також їх лінгвістичних термів, обраних на *Кроках 1* та *4*. Загальна кількість правил s визначається кількістю усіх можливих комбінацій лінгвістичних термів вхідних сигналів НР:

$$s = \prod_{i=1}^{n-1} m_i. \quad (11)$$

Консеквенти для кожного r -ого правила ($r = 1, \dots, s$) визначаються експертом або оператором з набору лінгвістичних термів вихідного сигналу НР u_{HP} , кількість яких m_n обрана на *Кроці 4*.

Крок 8. Встановлення обчислювальних процедур нечіткого логічного виведення НР. На даному етапі здійснюється вибір операцій агрегації, активації та акумуляції нечіткого логічного виведення НР температури. Як операції агрегації, наприклад, можуть бути застосовані операції «min» або «prod», як операції активації — «max» та як операції акумуляції — «max» або «sum» [3].

Крок 9. З'ясування методу дефазифікації НР. На цьому етапі обирається метод дефазифікації НР температури. Як метод дефазифікації НР САК температурними режимами може бути використаний один з таких: центру тяжіння, центру площини, лівого модального значення, правого модального значення та ін. [2, 6].

Крок 10. Оптимізація вектора параметрів ФНЛТ вхідних і вихідної змінних НР. Проводиться оптимізація вектора \mathbf{P} параметрів ФНЛТ вхідних і вихідної змінних НР температури на основі бажаних перехідних процесів САК температурними режимами реактора й методів градієнтного спуску чисельної оптимізації. Для оптимізації вектора параметрів ФНЛТ \mathbf{P} береться цільова функція I та її оптимальне значення I_{opt} , початкові значення (початкова гіпотеза \mathbf{P}_0) й обмеження зазначеного вектора $[\mathbf{P}_{\min}, \mathbf{P}_{\max}]$, а також тип процедури ітераційної оптимізації [4, 13].

За оптимізації вектора параметрів \mathbf{P} НР температури з урахуванням бажаних перехідних процесів САК температурними режимами реактора в багатьох випадках як цільову функцію доцільно обирати середнє інтегральне квадратичне відхилення $I(t, \mathbf{P})$ реальної перехідної характеристики САК $T_p(t, \mathbf{P})$ від бажаної $T_b(t)$:

$$I(t, \mathbf{P}) = \frac{1}{t_{\max}} \int_0^{t_{\max}} (T_b(t) - T_p(t, \mathbf{P}))^2 dt, \quad (12)$$

де t_{\max} — загальний час перехідного процесу САК температурними режимами реактора.

Бажана перехідна характеристика $T_b(t)$ будується за еталонною моделлю (ЕМ) САК температурними режимами реактора, яка може бути представлена передаточною функцією $W_{\text{EM}}(p)$ [9]:

$$W_{\text{EM}}(p) = \frac{T_b(p)}{T_3(p)} = \frac{1}{(T_{\text{EM}}p + 1)^v}, \quad (13)$$

де T_{EM} , v — стала часу й порядок передаточної функції ЕМ; p — оператор Лапласу.

Як початкові значення (початкова гіпотеза) вектора параметрів ФНЛТ вхідних і вихідної змінних НР приймаються значення вектора \mathbf{P}_0 , які попередньо визначені на *Кроці 6*.

Як обмеження для можливих значень вектора параметрів ФНЛТ вхідних і вихідної змінних НР \mathbf{X} доцільно використовувати межі робочих діапазонів змінних, встановлених на *Кроці 3*.

Ітераційні процедури оптимізації вектора параметрів ФНЛТ варто проводити на основі векторного рівняння (14) згідно з методом градієнтного спуску:

$$\mathbf{P}_{j,k}^i[\tau+1] = \mathbf{P}_{j,k}^i[\tau] - \gamma[\tau] \left. \frac{\partial I(\mathbf{P}_{j,k}^i)}{\partial \mathbf{P}_{j,k}^i} \right|_{\mathbf{P}_{j,k}^i[\tau]}, \quad (14)$$

де γ — вектор кроків градієнтного спуску; τ — номер ітерації. Вектор γ може визначатися різними шляхами залежно від обраного методу градієнтного спуску (з фіксованим кроком, подрібненим кроком, найшвидшого спуску та ін.).

Вищезазначені ітераційні процедури проводяться до виконання умови закінчення оптимізації параметрів ФНЛТ вхідних і вихідної змінної НР. Умова

закінчення процедур оптимізації параметрів ФНЛТ може вважатися завершеною у таких випадках: а) за досягнення оптимального значення цільової функції ($I = I_{\text{opt}}$); б) під час здійснення максимальної кількості ітерацій ($\tau = \tau_{\max}$); в) у випадку, коли протягом певної кількості ітерацій τ значення цільової функції I не зменшувалось. За умови виконання (а) здійснюється перехід на *Крок 12*. За реалізації умов (б) або (в) відбувається перехід на *Крок 11*.

Крок 11. Оптимізація вектора коефіцієнтів пропорційності при вхідних та вихідній змінних НР. На цьому етапі проводиться оптимізація вектору коефіцієнтів пропорційності \mathbf{K} при вхідних і вихідній змінних НР температури на основі бажаних перехідних процесів САК температурними режимами реактора й методів градієнтного спуску чисельної оптимізації. Для оптимізації вектора пропорційних коефіцієнтів \mathbf{K} застосовується цільова функція I та її оптимальне значення I_{opt} , початкові значення (початкова гіпотеза \mathbf{P}_0) й обмеження вектора $[\mathbf{P}_{\min}, \mathbf{P}_{\max}]$, а також тип процедури ітераційної оптимізації [4, 13].

Як цільову функцію оптимізації слід визначати середнє інтегральне квадратичне відхилення $I(t, \mathbf{K})$ реальної перехідної характеристики САК $T_p(t, \mathbf{K})$ від бажаної $T_b(t)$

$$I(t, \mathbf{K}) = \frac{1}{t_{\max}} \int_0^{t_{\max}} (T_b(t) - T_p(t, \mathbf{K}))^2 dt. \quad (15)$$

Як початкові значення (початкова гіпотеза) вектора пропорційних коефіцієнтів \mathbf{K} обираються значення вектора \mathbf{K}_0 , які попередньо встановлено на *Кроці 2*.

Обмеження для можливих значень вектора пропорційних коефіцієнтів \mathbf{K} представлено у вигляді виразу (16)

$$\mathbf{K}_i \in [\mathbf{K}_{i \min}, \mathbf{K}_{i \max}], \quad i = \{1, \dots, n\}, \quad (16)$$

де $\mathbf{K}_{i \min}$ і $\mathbf{K}_{i \max}$ — відповідні мінімальні й максимальні значення вектора коефіцієнтів пропорційності.

Ітераційні процедури оптимізації вектора пропорційних коефіцієнтів \mathbf{K} варто проводити на основі векторного рівняння (17) згідно з методом градієнтного спуску:

$$\mathbf{K}_i[\tau+1] = \mathbf{K}_i[\tau] - \gamma[\tau] \left. \frac{\partial I(\mathbf{K}_i)}{\partial \mathbf{K}_i} \right|_{\mathbf{K}_i[\tau]}. \quad (17)$$

Дані ітераційні процедури також здійснюється з метою виконання умови закінчення оптимізації, наведеної на *Кроці 10*. За реалізації умови (а) відбувається перехід на *Крок 12*. Під час здійснення умов (б) або (в) перехід може виконуватися на *Кроки 10, 9, 8, 7, 5, 4* або 1.

Крок 12. Структурна оптимізація БП НР. На даному етапі відбувається структурна оптимізація БП НР температури на основі оцінки впливу кожного r -го правила ($r = 1, \dots, s$) на процес керування та ви-

ключення тих правил, вплив яких є несуттєвим. Процедура структурної оптимізації БП НР складається з ідентифікації ступеня впливу правил БП на вихідний сигнал НР $u_{НР}$, побудови відповідного ранжированого ряду правил R зі зменшення цього параметра, а також виключення з БП тих правил, вплив яких на формування сигналу $u_{НР}$ є несуттєвим [10].

Ідентифікацію ступеня впливу правил БП на вихідний сигнал НР $u_{НР}$ доцільно проводити, базуючись на розрахунку зміни ступеня істинності правил в процесі керування $\mu^R(t)$ та оціночного функціоналу $G[\mu^R(t)]$, аргументом якого є $\mu^R(t)$ [10].

Зміна ступеня істинності $\mu^R(t)$ r -ого правила в процесі керування виражається функцією (18) від часу t :

$$\mu_r^R(t) = \bigcap_{i=1}^{n-1} \mu_i^r(X_i(t)) = \inf_{i=1}^{n-1} \mu_i^r(X_i(t)), \quad (18)$$

де μ_i^r — результат фазифікації i -ого вхідного сигналу НР X_i ($i = 1, \dots, n - 1$) відповідним лінгвістичним термом r -ого правила.

Оціночний функціонал $G_r[\mu_r^R(t)]$ впливу r -ого правила на процес керування обчислюється відповідно до (19) [10]:

$$G_r[\mu_r^R(t)] = \frac{1}{t_{\max}} \int_0^{t_{\max}} \mu_r^R(t) dt = \frac{1}{t_{\max}} \int_0^{t_{\max}} \inf_{i=1}^{n-1} \mu_i^r(X_i(t)) dt. \quad (19)$$

При цьому (для адекватного оцінювання впливу правил БП НР на процес керування) моделювання САК температурою піролізного реактора з розрахунку зміни ступенів істинності $\mu^R(t)$ та оціночних функціоналів $G[\mu^R(t)]$ правил БП на інтервалі часу від 0 до t_{\max} варто проводити в усіх можливих режимах функціонування (за різномісних ступінчатих і плавних збільшуваних вхідних і збурювальних впливів).

Ранжований ряд R правил складається з усіх правил БП НР, розташованих у порядку зменшення їх значень розрахованого оціночного функціоналу $G_r[\mu_r^R(t)]$.

Виключення з БП НР правил, вплив яких на формування вихідного сигналу НР $u_{НР}$ є несуттєвим, доцільно здійснювати послідовно, починаючи з кінця побудованого ранжированого ряду (R) до певного оптимального значення їхньої кількості $s_{\text{опт}}$, за якого значення цільової функції I не буде перевищувати оптимальне значення $I_{\text{опт}}$, а показники якості САК температурними режимами реактора будуть залишатися в допустимих межах [10].

Крок 13. Реалізація розробленого НР з використанням відповідної елементної бази. Структура НР буде спрощеною за рахунок редукції бази правил, проведеної в *Кроці 12*.

Крок 14. Використання та експериментальні дослідження розробленого НР в САК температурними режимами реактора СПК.

Вивчення ефективності вищенаведеної комплексної методики синтезу й оптимізації НР проводилось в процесі проектування НР типу Мамдані для САК температурними режимами піролізного реактора експериментального СПК.

Синтез та оптимізація НР типу Мамдані для САК температурними режимами піролізного реактора експериментального СПК. Робочий об'єм піролізного реактора й максимальна потужність ГП експериментального СПК складають 100 л і 25 кВт. САК температурними режимами реактора СПК та її КТ мають функціональні структури, наведені на рис. 1 та рис. 2. Математичну модель даного піролізного реактора як об'єкта керування температурою розроблено на основі рівнянь теплоенергетичних процесів і наведено в [9].

Як вектор вхідних і вихідної змінних даного НР температури в *Кроці 1* запропонованої методики обрано вектор X , який представлено виразом (2). На *Кроці 2* визначено вектор коефіцієнтів пропорційності K при вхідних і вихідній змінних НР температури X , презентовано виразом (6), та його попередні значення K_0 . В свою чергу, попередні значення коефіцієнтів $K_{\text{п0}}$ та $K_{\text{д0}}$ при вхідних змінних НР ε_T та $\frac{d\varepsilon_T}{dt}$ розраховані за формулою (9) й складають 0,1 та 0,2 ($K_{\text{п0}} = 0,1$; $K_{\text{д0}} = 0,2$). Попередні значення пропорційного коефіцієнта $K_{\text{у0}}$ за вихідної змінної НР $u_{НР}$ дорівнює одиниці ($K_{\text{у0}} = 1$).

На *Кроці 3* розробленої методики синтезу й оптимізації НР виділено робочі діапазони вхідних і вихідної змінних НР температури X . Для вхідних змінних ε_T та $\frac{d\varepsilon_T}{dt}$ робочі діапазони становлять від -1 до 1 , для вихідної змінної НР $u_{НР}$ — від 0 до 2 .

На *Кроці 4* обрано по 5 лінгвістичних термів для кожної вхідної й вихідної змінних НР температури ($m_i = 5$, $i = 1, 2, 3$). Для вхідних змінних НР ε_T та $\frac{d\varepsilon_T}{dt}$ використано такі лінгвістичні терми: BN — велика від'ємна; SN — мала від'ємна; Z — нульова; SP — мала додатна; BP — велика додатна. Для вихідної змінної $u_{НР}$ беруться лінгвістичні терми: Z — нульовий; S — малий; M — середній; B — великий; VB — дуже великий. Для усіх вищенаведених термів на *Кроці 5* застосовано трикутний тип функцій належності.

На *Кроці 6* визначено вектор P параметрів (вершин) ФНЛТ вхідних і вихідної змінних НР температури, який характеризується виразом (10), та його попередні значення P_0 . У цьому випадку вираз (10) приймає вигляд:

$$P = \{P_{j,k}^i\}, i = \{1, 2, 3\}, j = \{1, \dots, 5\}, k = \{1, 2, 3\}.$$

Попередні значення вектора параметрів ФНЛТ P_0 розраховано таким чином, щоб лінгвістичні терми вхідних і вихідної змінних НР X були рівномірно розподілені на робочих діапазонах. Зовнішній вигляд ФНЛТ вхідних і вихідної змінних НР з визначеними параметрами наведено на рис. 3.

На Кроці 7 здійснено попередній синтез БП НР температури з урахуванням вхідних і вихідної змінних X , а також їх лінгвістичних термів, обраних на Кроках 1 та 4. Загальна кількість правил s згідно з (11) дорівнює 25. Кожне правило синтезованої БП являє собою лінгвістичне твердження, виражене у (20):

$$\text{IF "}\varepsilon_T = x\text{" AND "}\frac{d\varepsilon_T}{dt} = y\text{" THEN "}\mu_{HP} = z\text{"}, \quad (20)$$

де x, y, z — відповідні значення лінгвістичних термів.

Синтезовану на даному етапі БП НР температури подано в табл. 1.

На Кроці 8 визначено обчислювальні процедури нечіткого логічного виведення НР температури. У цьому випадку за операцію агрегації обрано операцію «min», за операцію активації — «max» і за операцію акумуляції — «max». Метод дефазифікації НР температури на Кроці 9 презентований методом центру тяжіння.

Для перевірки ефективності синтезованого НР температури проведено комп'ютерне моделювання перехідних процесів і порівняльний аналіз показників якості САК температурними режимами реактора СПК з розробленим НР й оптимально налаштованим традиційним ПД-контролером.

Як ЕМ САК температурою реактора обрано передаточну функцію, що представлено виразом (13)

з параметрами: $T_{EM} = 64$ с, $v = 3$. Оптимальне значення цільової функції дорівнює $I_{opt} = 500$. Передаточна функція $W_{ПД}(p)$ традиційного ПД-контролера має вигляд:

$$W_{ПД}(p) = K_p + \frac{K_I}{p} + \frac{K_D p}{T_F p + 1}, \quad (21)$$

де K_p, K_I, K_D та T_F — коефіцієнти й стала часу фільтра ПД-контролера, які знайдені в процесі параметричної оптимізації на основі бажаних перехідних процесів за допомогою градієнтного методу найшвидшого спуску й цільової функції, що виражається (15). У свою чергу, $K_p = 2,189$; $K_I = 0,0094$, $K_D = 127,1$; $T_F = 1,035$. Крім того, в даному ПД-контролері для усунення ефекту інтегрального насичення застосовується функція алгоритмічної заборони інтегрування при досягненні сигналом керування максимально можливого значення.

У табл. 2 наведено порівняльний аналіз показників якості САК температурними режимами реактора СПК з розробленим НР й оптимально налаштованим традиційним ПД-контролером, де позначено: σ —

перерегулювання, $\sigma = \frac{T_{max} - T_p}{T_p} \cdot 100\%$; t_p — час регу-

лювання; Δ — статична помилка, $\Delta = \frac{T_3 - T_p}{T_3} \cdot 100\%$;

μ — коливальність (число переходів через значення T_p за час t_{max}).

На рис. 4 зображено перехідні процеси САК температурними режимами реактора СПК.

Табл. 2 і рис. 4 демонструє, що САК з синтезованим на даному етапі неоптимізованим НР має гірші показники якості, ніж ЕМ САК температури й САК з оптимально налаштованим традиційним ПД-

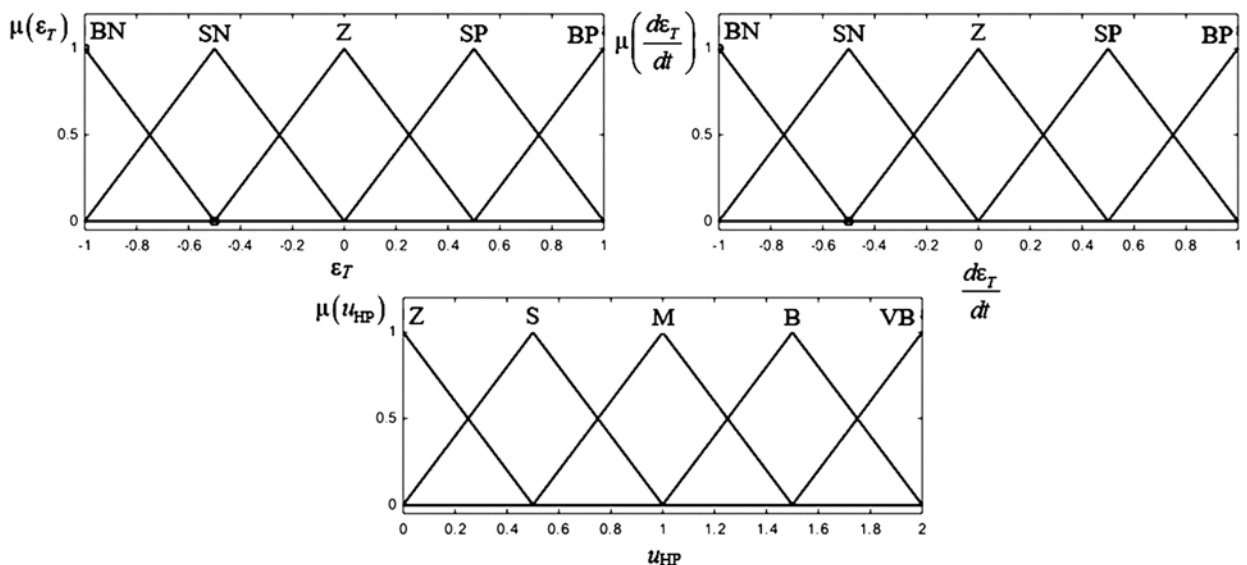


Рис. 3. Зовнішній вигляд ФНЛТ вхідних і вихідної змінних НР

контролером. Значення цільової функції I для обох САК з неоптимізованим НР й оптимально налаштованим традиційним ПІД-контролером значно більші за задане оптимальне значення I_{opt} .

Таким чином, для підвищення показників якості САК температурою з синтезованим НР проведено оптимізацію вектора параметрів ФНЛТ його вхідних і вихідної змінних на Кроці 10. Як цільову функцію запропоновано рівняння (12). Початковими значеннями (початковою гіпотезою) вектора параметрів ФНЛТ P вхідних і вихідної змінних НР є попередньо визначені на Кроці 6 значення вектора P_0 . Як обмеження для можливих значень вектора параметрів ФНЛТ вхідних і вихідної змінних НР X обрано встановлені на Кроці 3 межі робочих діапазонів цих змінних. Ітераційні процедури оптимізації вектора параметрів ФНЛТ проведено на основі векторного рівняння (14) згідно з градієнтним методом найшвидшого спуску.

За допомогою проведеної на згаданому кроці оптимізації вектора параметрів ФНЛТ НР вдалося знизити значення цільової функції до $I = 1166$ і дещо підвищити показники якості САК температурними режимами реактора. Зовнішній вигляд ФНЛТ вхідних і вихідної змінних НР з оптимізованими параметрами показано на рис. 5.

Перехідні процеси й порівняльний аналіз показників якості САК температурними режимами реактора СПК на основі НР з оптимізованими параметрами ФНЛТ й оптимально налаштованого традиційного ПІД-контролера представлено на рис. 6 і в табл. 3.

З табл. 3 і рис. 6 виходить, що САК на основі НР з оптимізованими параметрами ФНЛТ має трохи кращі показники якості, ніж САК з оптимально налаштованим традиційним ПІД-контролером, однак, значення її цільової функції I все ще більше від заданого оптимального значення I_{opt} . Тому для подальшого

Таблиця 1. База правил НР температури

		Швидкість зміни помилки, $d\varepsilon_T/dt$				
		BN	SN	Z	SP	BP
Помилка, ε_T	BN	Z	Z	Z	Z	S
	SN	Z	Z	Z	S	M
	Z	Z	S	M	B	VB
	SP	M	B	VB	VB	VB
	BP	B	VB	VB	VB	VB

Таблиця 2. Порівняльний аналіз показників якості САК температурними режимами реактора СПК

Показники якості	Показники якості САК температурними режимами		
	ЕМ	Оптимізований ПІД-контролер	Неоптимізований НР
$\sigma, \%$	0	11	25,3
t_p, c	400	655	760
$\Delta, \%$	0	0	0
μ	0	1	1
I	0	1582	6861

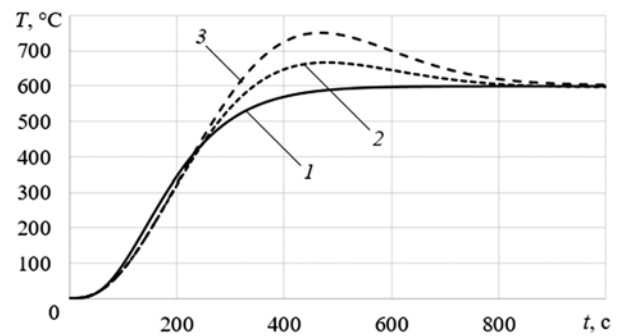


Рис. 4. Перехідні процеси:

1 — ЕМ САК температури; 2 — САК з традиційним ПІД-контролером; 3 — САК з неоптимізованим НР

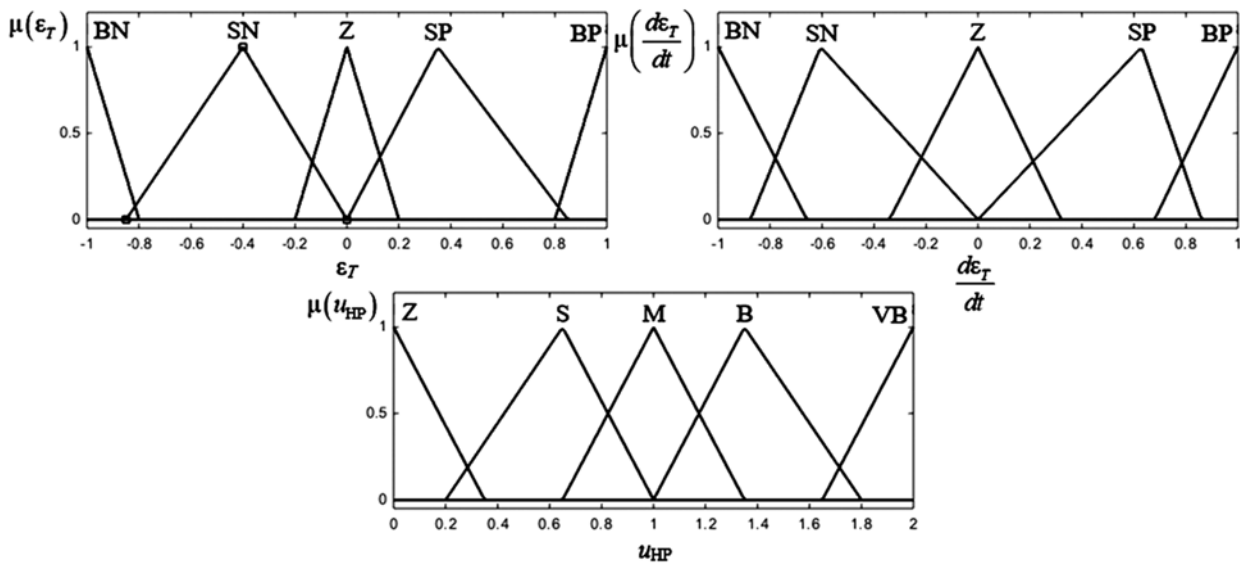


Рис. 5. Зовнішній вигляд ФНЛТ вхідних і вихідної змінних НР з оптимізованими параметрами

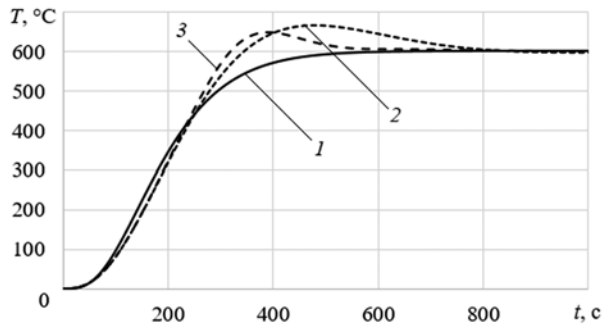


Рис. 6. Перехідні процеси:

1 — ЕМ САК температури; 2 — САК з традиційним ПІД-контролером; 3 — САК на основі НР з оптимізованими параметрами ФНЛТ

зниження значення цільової функції I й підвищення показників якості САК температурою з синтезованим НР проведено оптимізацію вектора коефіцієнтів пропорційності K при вхідних і вихідній змінних НР на Кроці 11.

Як цільову функцію в даному випадку обрано рівняння (15). Початковими значеннями (початковою гіпотезою) вектора пропорційних коефіцієнтів K стали попередньо визначені на Кроці 2 значення вектора K_0 . У свою чергу, для можливих значень вектора K встановлено такі обмеження:

$$K_{\text{П}} \in [0, 0,5; 0, 2]; K_{\text{Д}} \in [0, 1; 0, 35];$$

$$K_{\text{У}} \in [0, 5; 2].$$

Ітераційні процедури оптимізації вектора коефіцієнтів K проведено на основі векторного рівняння (17) згідно з градієнтним методом найшвидшого спуску.

За допомогою проведеної на вказаному кроці оптимізації вектора коефіцієнтів K вдалося досягти значення цільової функції $I = 236$, що менше заданого оптимального значення $I_{\text{опт}}$, та значно підвищити показники якості САК температурними режимами реактора. Оптимізовані значення вектора коефіцієнтів пропорційності K складають: $K_{\text{П}} = 0,142$; $K_{\text{Д}} = 0,285$; $K_{\text{У}} = 1,127$. Перехідні процеси й порівняльний аналіз показників якості САК температурними режимами

Таблиця 3. Порівняльний аналіз показників якості САК на основі НР з оптимізованими параметрами ФНЛТ й оптимально налаштованого ПІД-контролера

Показники якості	Показники якості САК температурними режимами		
	ЕМ	Оптимізований ПІД-контролер	НР з оптимізованими параметрами ФНЛТ
$\sigma, \%$	0	11	8,16
$t_p, \text{с}$	400	655	459
$\Delta, \%$	0	0	0
μ	0	1	1
I	0	1582	1166

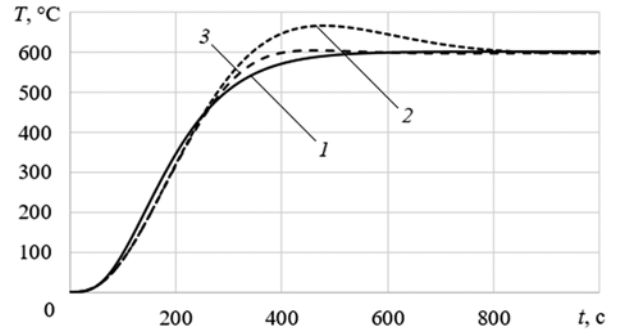


Рис. 7. Перехідні процеси:

1 — ЕМ САК; 2 — САК з ПІД-контролером; 3 — САК на основі НР з оптимізованими параметрами ФНЛТ та коефіцієнтами K

реактора СПК на основі НР з оптимізованими параметрами ФНЛТ і коефіцієнтами K , а також оптимально налаштованого ПІД-контролера представлено на рис. 7 і в табл. 4.

Табл. 4 і рис. 7 показують, що САК на основі НР з оптимізованими параметрами ФНЛТ і пропорційними коефіцієнтами K має досить високі показники якості керування, а значення її цільової функції лежить в оптимальних межах.

Таким чином, здійснено перехід на Кроці 12 для подальшого виконання структурної оптимізації й зменшення БП НР температури.

Розрахунок зміни ступенів істинності $\mu^R(t)$ й оціночних функціоналів $G_r[\mu_r^R(t)]$ впливу на процес

керування правил БП НР на Кроці 12 здійснено за допомогою формул (18) і (19), у процесі моделювання САК температурою піролізного реактора в усіх можливих режимах функціонування (за різнотипних ступінчатих і плавно збільшуваних вхідних і збурювальних впливів). Діаграму оціночних функціоналів $G_r[\mu_r^R(t)]$ впливу на процес керування усіх правил БП НР температури наведено на рис. 8.

На основі розрахованих значень оціночного функціоналу $G_r[\mu_r^R(t)]$ побудований ранжований

Таблиця 4. Порівняльний аналіз показників якості САК на основі НР з оптимізованими параметрами ФНЛТ та коефіцієнтами K , а також ПІД-контролера

Показники якості	Показники якості САК температурними режимами		
	ЕМ	Оптимізований ПІД-контролер	НР з оптимізованими параметрами ФНЛТ і коефіцієнтами K
$\sigma, \%$	0	11	0,83
$t_p, \text{с}$	400	655	343
$\Delta, \%$	0	0	0
μ	0	1	0
I	0	1582	236

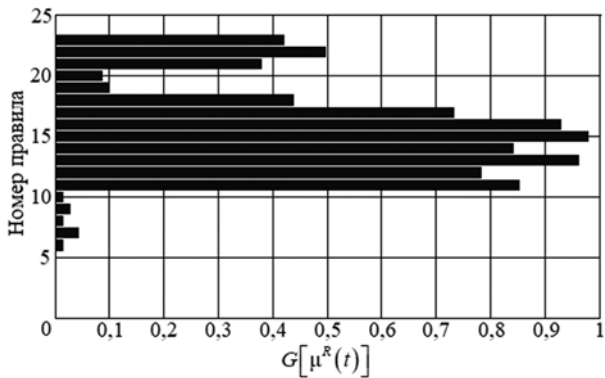


Рис. 8. Діаграма оціночних функціоналів впливу на процес керування правил БП НР температури

ряд правил R зі зменшення даного параметра, який має вигляд:

$$R = \{15, 13, 16, 11, 14, 12, 17, 22, 18, 23, 21, 19, 20, 7, 9, 6, 8, 10, 1, 2, 3, 4, 5, 24, 25\}.$$

Виключення з БП НР правил, вплив яких на формування вихідного сигналу НР $u_{НР}$ є несуттєвим, проводилось послідовно за одним правилом (починаючи з кінця побудованого ранжируваного ряду R) до оптимального значення їхньої кількості s_{opt} , за якого значення цільової функції I не перевищує оптимальне значення I_{opt} , а показники якості САК температурними режимами реактора залишаються в допустимих межах. У свою чергу, $s_{opt} = 14$.

Перехідні процеси й порівняльний аналіз показників якості САК температурними режимами реактора СПК на основі оптимізованих НР з повною й зменшеною (оптимізованою) БП представлено на рис. 9 і в табл. 5.

З табл. 5 і рис. 9 робимо висновок, що САК на основі оптимізованого НР зі зменшеною БП має досить високі показники якості керування, а значення її цільової функції лежить в допустимих межах. Таким чином, розроблений та оптимізований НР може бути застосований у САК температурними режимами реактора експериментального СПК на Кроці 13.

Таблиця 5. Порівняльний аналіз показників якості САК на основі оптимізованих НР з повною та зменшеною (оптимізованою) БП

Показники якості	Показники якості САК температурними режимами		
	ЕМ	Оптимізований НР з повною БП	Оптимізований НР зі зменшеною БП
$\sigma, \%$	0	0,83	4
t_p, c	400	343	339
$\Delta, \%$	0	0	0
μ	0	0	0
I	0	236	422

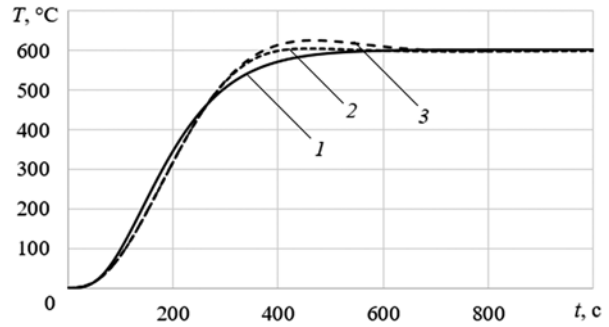


Рис. 9. Перехідні процеси:

1 — ЕМ САК; 2 — САК на основі оптимізованого НР з повною БП; 3 — САК на основі оптимізованого НР зі зменшеною БП

Застосування процедур оптимізації векторів параметрів ФНЛТ P і коефіцієнтів K вхідних і вихідної змінних НР на Кроках 10 і 11 дозволило суттєво підвищити показники якості САК температурними режимами реактора експериментального СПК.

Подальше проведення структурної оптимізації БП даного НР температури на Кроці 12 дало змогу зменшити загальну кількість правил БП на 14 правил без погіршення показників якості САК температурними режимами. Це дозволить значно спростити програмну й апаратну реалізацію синтезованого НР в САК температурними режимами реактора експериментального СПК.

Вищенаведені дослідження підтверджують високу ефективність запропонованої комплексної методики синтезу й оптимізації НР типу Мамдані для САК температурними режимами піролізних реакторів СПК. Застосування розроблених на основі цієї методики НР температури дозволить забезпечувати достатньо високі показники якості САК температурними режимами піролізних реакторів СПК за відносно нескладної програмної та апаратної реалізації.

ВИСНОВКИ. Проведено розробку формалізованої з математичної точки зору комплексної методики синтезу й оптимізації НР типу Мамдані для САК температурними режимами піролізних реакторів СПК й дослідження її ефективності.

Запропонована комплексна методика дає змогу здійснювати попередній синтез структури й параметрів НР типу Мамдані для САК температурними режимами піролізних реакторів СПК на основі експертних оцінок, а також подальші послідовні процедури оптимізації параметрів та структури БП даних НР з урахуванням методів математичного програмування. Зокрема, параметрична оптимізація НР температури виконується, базуючись на бажаних перехідних процесах і методах градієнтного спуску чисельної оптимізації, й дозволяє суттєво підвищити показники якості САК температурними режимами реакторів СПК. Структурна оптимізація БП даних НР здійснюється за

допомогою оцінки впливу кожного правила на процес керування й зменшує загальну кількість правил БП без погіршення показників якості керування температурою. Це сприяє значному спрощенню програмної й апаратної реалізації синтезованих НР у САК температурними режимами піролізних реакторів СПК.

Для дослідження ефективності створеної комплексної методики синтезу й оптимізації НР проведено проектування НР типу Мамдані для САК температурними режимами піролізного реактора експериментального СПК. Розроблений НР температури має

достатньо просту програмно-апаратну реалізацію й високі показники якості керування температурними режимами піролізного реактора експериментального СПК, що підтверджує високу ефективність запропонованої методики.

Таким чином, застосування розроблених на основі наведеної методики НР в САК температурними режимами піролізних реакторів СПК дозволяє забезпечувати достатньо високі показники якості керування за відносно нескладної їх програмно-апаратної реалізації.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] **Рижков С. С.** Експериментальні дослідження утилізації органічних відходів методом багатоконтурного циркуляційного піролізу [Текст] / С. С. Рижков, Л. М. Маркіна // Збірник наукових праць НУК. — 2007. — № 5. — С. 100–106.
- [2] **Ротштейн А. П.** Интеллектуальные технологии идентификации: нечеткие множества, генетические алгоритмы, нейронные сети [Текст] / А. П. Ротштейн. — Винница : «УНІВЕРСУМ-Вінниця», 1999. — 300 с.
- [3] **Рутковская Д.** Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы [Текст]: Пер. с польск. И. Д. Рудинского. / Д. Рутковская, М. Пилиньский, Л. Рутковский. — М. : Горячая линия — Телеком, 2006. — 452 с.
- [4] **Barreto A. M. S.** Restricted Gradient-Descent Algorithm for Value-Function Approximation in Reinforcement Learning [Text] / A. M. S. Barreto, C. W. Anderson // Artificial Intelligence. — 2008. — № 172, Issues 4–5. — Pp. 454–482.
- [5] **Gacto M. J.** Adaptation and Application of Multi-Objective Evolutionary Algorithms for Rule Reduction and Parameter Tuning of Fuzzy Rule-Based Systems [Text] / M. J. Gacto, R. Alcalá, F. Herrera // Soft Computing. — 2009. — № 5. — Pp. 419–436.
- [6] **Hampel R.** Fuzzy Control: Theory and Practice [Text] / R. Hampel, M. Wagenknecht, N. Chaker. — New York : Physika-Verlag, Heidelberg, 2000. — 410 p.
- [7] **Kondratenko Y. P.** Fuzzy Controllers in Reactors Control Systems of Multiloop Pyrolysis Plants [Text] / Y. P. Kondratenko, O. V. Kozlov // 19th Zittau Fuzzy Colloquium: Proceedings of East-West Fuzzy Colloquium 2012. — Zittau : Hochschule Zittau/Goerlitz, Germany, 2012. — Pp. 15–22.
- [8] Green-IT Approach to Design and Optimization of Thermoacoustic Waste Heat Utilization Plant Based on Soft Computing [Text] / Y. Kondratenko, V. Korobko, O. Korobko, G. Kondratenko, O. Kozlov // Chapter in a book: “Green IT Engineering: Components, Networks and Systems Implementation». — V. Kharchenko, Y. Kondratenko, J. Kacprzyk (Eds.). Book Series: Studies in Systems, Decision and Control. — Vol. 105. — Berlin. Heidelberg : Springer International Publishing, 2017. — Pp. 287–311.
- [9] **Kondratenko Y. P.** Mathematic Modelling of Reactor’s Temperature Mode of Multiloop Pyrolysis Plant [Text] / Y. P. Kondratenko, O. V. Kozlov // Lecture Notes in Business Information Processing: Modelling and Simulation in Engineering, Economics and Management. — K. J. Engemann, A. M. Gil-Lafuente, J. M. Merigo (Eds.). — Vol. 115. — Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2012. — P. 178–187.
- [10] **Kondratenko Y.** Structural and Parametric Optimization of Fuzzy Control and Decision Making Systems [Text] / Y. Kondratenko, D. Simon // World Conference on Soft Computing. — Berkeley, CA, 2016. — Pp. 1–6.
- [11] **Kondratenko Y. P.** Structural Optimization of Fuzzy Systems’ Rules Base and Aggregation Models [Text] / Y. P. Kondratenko, L. P. Klymenko, E. Y. M. Al Zu’bi // Kybernetes, 2013. — Vol. 42. — Issue 5. — 2013. — Pp. 831–843.
- [12] Synthesis and Optimization of Fuzzy Control System for Floating Dock’s Docking Operations [Text] / Y. P. Kondratenko, O. V. Kozlov, O. V. Korobko, A. M. Topalov // Chapter in a book «Fuzzy Control Systems: Design, Analysis and Performance Evaluation». — Wendy Santos (Eds.). — New York City, USA, Nova Science Publishers, 2017. — Pp. 141–215.
- [13] **Kondratenko Y. P.** The Optimization of Digital Controllers for Fuzzy Systems Design. Advances in Modelling and Analysis [Text] / Y. P. Kondratenko, T. A. Altameem, E. Y. M. Al Zu’bi // AMSE Periodicals. — 2010. — Series A. — Vol. 47. — Issue 1-2. — Pp. 19–29.
- [14] **Simon D.** H_{∞} Estimation for Fuzzy Membership Function Optimization [Text] / D. Simon // Intern. Journal of Approximate Reasoning, 2005. — № 40. — Pp. 224–242.

© О. В. Козлов, Г. В. Кондратенко, Ю. П. Кондратенко
Надійшла до редколегії 08.11.17
Статтю рекомендує до друку член редколегії ЗНП НУК
д-р техн. наук, проф. Г. В. Павлов