

Нальотов Д.Р.

<https://orcid.org/0009-0004-8460-0974>

Харківський національний університет радіоелектроніки

Ляшенко О.С.

<https://orcid.org/0000-0002-0146-3934>

Харківський національний університет радіоелектроніки

МОДЕЛЬ КЕРУВАННЯ СКЛАДНИМ ТЕХНОЛОГІЧНИМ ОБ'ЄКТОМ НА ОСНОВІ МЕТОДІВ НЕЧІТКОЇ ЛОГІКИ

У роботі розглянуто проблему підвищення ефективності управління складними технологічними об'єктами в умовах змінних параметрів, характерних для сучасних промислових та енергетичних систем. Зазначено, що використання традиційних підходів, зокрема ПД-регуляторів, не завжди забезпечує необхідну адаптивність та швидкість реакції на зміни параметрів технологічного процесу, що обґрунтовує доцільність застосування методів нечіткої логіки для побудови більш гнучких та інтелектуальних систем управління. Об'єктом дослідження є процес управління турбіною на теплоелектроцентралі (ТЕЦ), яка включає котли, турбіни та допоміжне обладнання, що функціонують в умовах змінних навантажень, температури та тиску пари. Предметом дослідження виступають адаптивні моделі управління на основі нечіткої логіки, здатні враховувати невизначеність вхідних даних і формувати гнучкі керуючі рішення на основі нечітких правил. У рамках дослідження розроблено математичну модель управління, що базується на використанні фазифікації вхідних параметрів, системи нечітких правил прийняття рішень та процедури дефазифікації для формування керуючих сигналів. Такий підхід дозволяє перетворювати чіткі значення параметрів технологічного процесу, зокрема температури та тиску пари, у нечіткі множини, що описують стан системи у вигляді лінгвістичних змінних, таких як "низька", "середня" або "висока".

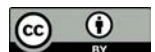
Особливу увагу приділено формуванню функцій належності та розробці нечітких правил управління, які враховують взаємозв'язок між температурою котла, тиском пари та навантаженням турбіни. Для перевірки ефективності запропонованої моделі було проведено комп'ютерне моделювання у середовищі MATLAB із використанням модуля Fuzzy Logic Toolbox. У ході симуляції досліджувалась реакція системи управління на зміну основних технологічних параметрів, а також аналізувалась поведінка системи під час регулювання подачі палива залежно від температури та тиску.

Отримані результати моделювання підтвердили, що запропонована модель на основі нечіткої логіки дозволяє підвищити стабільність роботи обладнання, зменшити коливання параметрів технологічного процесу та скоротити час реакції системи управління на зміну умов роботи. Крім того, застосування нечіткої логіки сприяє зниженню витрат палива, підвищенню енергоефективності та зменшенню негативного екологічного впливу енергетичних об'єктів. Запропоновані підходи можуть бути використані для модернізації систем управління енергетичних підприємств, а також адаптовані до інших промислових систем, що функціонують в умовах невизначеності та динамічної зміни параметрів.

Ключові слова: нечітка логіка, адаптивне управління, ТЕЦ, фазифікація, стабільність системи, турбіна.

Постановка проблеми. Сьогодні багато галузей промисловості стикаються з проблемою ефективного управління складними технологічними системами, які працюють у динамічному та змінному середовищі [1, 2]. Зокрема, енергетичні об'єкти, виробничі лінії та інші промислові процеси вимагають не лише точного контролю, але й здатності швидко адаптуватися до змін, що

постійно відбуваються в їхній роботі. Традиційні методи управління, як правило, засновані на жорстких алгоритмах, що забезпечують контроль лише в стабільних умовах, однак у випадку швидких змін чи непередбачених ситуацій їхня ефективність значно знижується. Наприклад, на енергетичних підприємствах, де рівень споживання електроенергії може змінюватися в реальному



часі через зміну погодних умов чи навантаження, точні математичні моделі і класичні підходи не завжди здатні забезпечити необхідну гнучкість і швидкість реакції. Це, у свою чергу, може призвести до збоїв у роботі обладнання або значних витрат палива [4].

У процесі управління складними технологічними об'єктами, зокрема такими, як енергетичні станції, важливо забезпечити не лише стабільність роботи, але й гнучкість та адаптивність до постійно змінюваних умов. Одна з основних проблем, з якими стикаються традиційні системи управління, полягає в їхній жорсткості та обмеженій здатності реагувати на раптові зміни. Такі методи управління, як ПД-регулятори, хоча і ефективні в стабільних умовах, часто не здатні забезпечити належну реакцію на динамічні зміни параметрів. Як результат, виникають збої або значні втрати ефективності.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Методи нечіткої логіки дозволяють створювати адаптивні моделі, які регулюють параметри об'єктів без необхідності точного математичного опису кожного процесу. Нечітка логіка працює з розмитими множинами, де значення параметрів можуть бути частково належати до кількох категорій одночасно. Це дає змогу системам автоматично реагувати на зміни у параметрах роботи об'єкта, без необхідності чітко прогнозувати майбутні коливання. Наприклад, в енергетичних системах, де навантаження постійно змінюється, нечітка логіка дозволяє оптимізувати потужність без точного передбачення цих змін, забезпечуючи при цьому безперебійну та стабільну роботу системи [3].

Система управління на ТЕЦ в даний час базується на класичних підходах, що використовують ПД-регулятори та програмовані логічні контролери (PLC) [7]. ПД-регулятори потребують точного математичного опису всіх процесів, що ускладнює їх адаптацію до змін в реальному часі. Як наслідок, традиційна система не завжди здатна швидко реагувати на зміни, що призводить до збоїв у роботі турбін та котлів і підвищення витрат палива.

Турбіни ТЕЦ перетворюють теплову енергію пари в механічну енергію, яка потім використовується для генерації електричної енергії [6, 8, 9]. Однак на цьому етапі до цього управлялось традиційними системами, які не завжди встигають оперативно реагувати на зміни в тиску і температурі пари, що може призвести до неефективного використання палива і зниження стабільності роботи турбін. Використання нечіткої логіки

дозволить прискорити реакцію підконтролера на зміни в умовах роботи турбін, що значно покращить їхню ефективність.

Постановка завдання. Основною метою цього дослідження є вивчення можливостей застосування нечіткої логіки для підвищення ефективності управління складними технологічними об'єктами. Особливу увагу приділено розробці адаптивних моделей управління, що можуть обробляти нечіткі дані і приймати рішення на основі кількох взаємопов'язаних параметрів. Дослідження охоплює аналіз переваг нечіткої логіки над традиційними підходами, а також її потенціал у забезпеченні стабільності та оптимальності роботи технічних систем, що працюють в умовах швидких змін. Моделі на основі нечіткої логіки можуть бути застосовані для вдосконалення існуючих методів управління турбіною на об'єктах, де швидкість реакції на зміни параметрів може суттєво підвищити ефективність роботи обладнання та зменшити витрати ресурсів.

У рамках роботи також буде проведено порівняння традиційних підходів і моделей на основі нечіткої логіки для визначення їхніх переваг та обмежень у різних умовах. Завдяки використанню нечіткої логіки, можливо значно покращити адаптивність, зменшити коливання в параметрах, що критично важливо для таких об'єктів, як енергетичні станції, де стабільність і ефективність роботи є вирішальними факторами для досягнення високих результатів.

Це дослідження має на меті забезпечити наукову основу для впровадження інноваційних методів управління в промислових і енергетичних об'єктах, сприяючи їх модернізації та підвищенню енергоефективності.

Виклад основного матеріалу. У цьому контексті розробка та впровадження нових методів управління, зокрема на основі нечіткої логіки, відкриває можливості для створення більш гнучких і ефективних систем, що здатні адаптуватися до змінюваних умов роботи без необхідності точного математичного опису всіх параметрів. Для цього було обрано процес управління турбіною на теплоелектроцентралі (Далі - ТЕЦ), оскільки він є важливою частиною енергетичної інфраструктури та працює в умовах, де необхідно швидко реагувати на зміни навантаження і параметрів.

Турбіна ТЕЦ була обрана в якості об'єкта дослідження через її критичне значення для енергетичної інфраструктури та необхідність у стабільному регулюванні параметрів, таких як температура котлів, тиск пари та навантаження на турбіни. Система управління турбіною включає компо-

ненти, що працюють у складних і змінних умовах. Одним з основних компонентів, що потребує покращення, є система управління турбіною, де традиційні ПД-регулятори не завжди встигають швидко реагувати на зміни в параметрах.

У зв'язку з цим, було прийнято рішення розробити модель управління на основі нечіткої логіки, яка дозволяє швидко адаптувати параметри регулювання, зокрема, температури та тиску, і забезпечити стабільну роботу в умовах, коли зміни є значними і швидкими.

Одним із основних підходів до вирішення задач управління складними технологічними об'єктами є використання нечіткої логіки, що базується на фазифікації вхідних параметрів і нечітких правилах для прийняття рішень. Фазифікація – це процес перетворення чітких величин (наприклад, температури чи тиску) у нечіткі множини, що описують ці параметри через категорії, як "низька", "середня" або "висока". Це дозволяє системі адаптуватися до змін вхідних умов без необхідності точного математичного опису кожного параметра. Нечіткі правила для прийняття рішень дозволяють враховувати різні комбінації вхідних параметрів і забезпечують гнучкість і точність управлінських рішень.

Порівняно з традиційними методами управління, система нечіткої логіки має кілька переваг:

- адаптивність: вона здатна швидко реагувати на зміни вхідних параметрів, таких як температура або тиск.

- гнучкість: нечітка логіка не вимагає точних математичних моделей і може працювати з розмитими даними.

Математична модель управління, побудована на основі нечіткої логіки, включає кілька етапів, кожен з яких сприяє оптимізації процесів управління. На першому етапі відбувається фазифікація вхідних параметрів, таких як температура або тиск, у нечіткі множини. Наприклад, температура котла може бути переведена в категорії "низька", "середня" або "висока" з відповідними ступенями належності.

В математичній моделі управління використовується формула фазифікації для температури:

$$\mu_{\text{низька}}(T) = \max\left(0, \frac{T_{\text{max}} - T}{T_{\text{max}} - T_{\text{min}}}\right), \quad (1)$$

де T – поточна температура, T_{min} та T_{max} – мінімальне та максимальне значення температури відповідно.

Наступним етапом є нечіткі правила для прийняття рішень. Це можуть бути такі правила:

Якщо температура висока і тиск низький, то зменшити подачу палива.

Якщо навантаження високе і тиск середній, то збільшити потужність турбіни.

Нарешті, відбувається дефазифікація, що включає перетворення нечітких результатів в чіткі команди для управління котлом і турбіною за допомогою методу центру ваги через формулу:

$$y = \frac{\sum_i \mu_i \cdot x_i}{\sum_i \mu_i}, \quad (2)$$

де μ_i – ступінь належності, x_i – чітке значення.

Це дозволяє отримати оптимальні та стабільні результати управління.

Для перевірки ефективності запропонованої моделі управління на основі нечіткої логіки було проведено симуляцію роботи системи, яка враховує змінні параметри, характерні для турбіни ТЕЦ. Симуляція проводилась за допомогою MATLAB і включала використання модуля Fuzzy Logic Toolbox, який дозволяє моделювати складні системи в умовах, максимально наближених до реальних. Це дозволило оцінити, як система реагує на зміну температури, тиску [8] та навантаження [3] і наскільки ефективно вона адаптується до цих змін.

Одним із ключових аспектів симуляції було вивчення, як нечіткі множини описують температуру котла. Використання фазифікації дозволяє віднести значення температури до категорій "низька", "середня" та "висока", причому кожна з цих категорій характеризується своїми функціями належності. Для наочності цієї концепції наводиться на рис. 1.

Низька температура (синя лінія):

Ступінь належності μ дорівнює 1, якщо температура нижче або дорівнює 200°C, і зменшується до 0 при температурі 300°C. Наприклад, при температурі 250°C ступінь належності до "низької температури" буде 0.5.

Середня температура (зелена лінія):

Ступінь належності збільшується від 0 при 200°C, досягає максимуму (1) при 300–400°C і зменшується до 0 при 500°C. Це показує, що "середня температура" характеризує значення в цьому діапазоні.

Висока температура (червона лінія):

Ступінь належності дорівнює 0 при температурах нижче 400°C, зростає до 1 при 500°C. Це означає, що температура вище 400°C розглядається як "висока".

Цей графік показує, як значення температури поділяються на три нечіткі множини: "низька темпе-

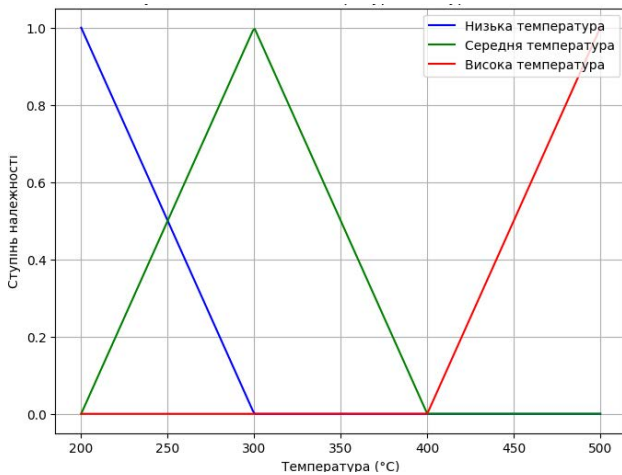


Рис. 1. Графік функції належності температури для турбіни ТЕЦ

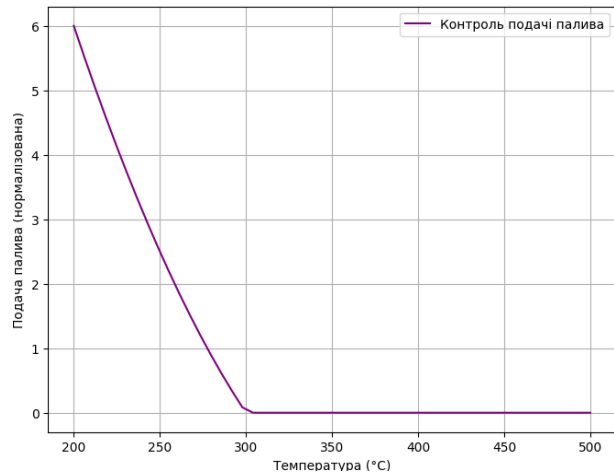


Рис. 2. Графік симуляції контролю подачі палива для турбіни ТЕЦ

ратура", "середня температура" та "висока температура". Для кожної точки температури визначається ступінь належності до однієї або кількох множин.

Далі симуляція включала тестування контролю подачі палива, де система мала адаптувати подачу залежно від змін температури та тиску. Основною метою було забезпечити стабільність роботи котла і турбіни, мінімізуючи витрати палива та уникаючи коливань параметрів, які можуть призвести до неефективної роботи обладнання. На основі моделювання результатів роботи системи отримано рис. 2.

При низьких значеннях температури ($T < 300^{\circ}\text{C}$) і високому тиску ($P > 12$), подача палива зменшується. Це пояснюється тим, що система вважає такі умови близькими до оптимальних і не потребує додаткового палива.

При середніх значеннях температури ($300^{\circ}\text{C} < T < 400^{\circ}\text{C}$) і середньому тиску ($P \approx 10$), подача палива стабільна. Це вказує на те, що система підтримує рівновагу.

При високих температурах ($T > 400^{\circ}\text{C}$) і низькому тиску ($P < 10$), подача палива різко збільшується. Це необхідно для стабілізації параметрів роботи системи.

Цей графік демонструє залежність контролю подачі палива від двох основних параметрів: температури T і тиску P . Лінія на графіку відображає, як система управління змінює подачу палива залежно від поточних значень температури та тиску.

Висновки. Впровадження системи управління на основі нечіткої логіки для турбіни на ТЕЦ дозволить значно підвищити ефективність та стабільність роботи цього обладнання. Це забезпечить зниження витрат палива, підвищить економічну ефективність і зменшить негативний вплив на навколишнє середовище завдяки зменшенню викидів шкідливих газів. Система, побудована на основі нечіткої логіки, дозволяє ефективно реагувати на змінні параметри, що робить її важливим інструментом для майбутньої модернізації енергетичних об'єктів.

Список літератури:

1. Ross T. J. Fuzzy Logic with Engineering Applications. Wiley, 2010. – 648 с.
2. Ogata K. Modern Control Engineering. Prentice Hall, 2009. – 912 с.
3. Palm R. Fuzzy Control in Industrial Automation: Theory and Applications. Springer, 2000. – 472 с.
4. Gupta M. M., Saroj K. Introduction to Fuzzy Sets, Fuzzy Logic, and Fuzzy Control Systems. CRC Press, 1999. – 356 с.
5. Steam Turbine: Working Principle, Types, and Applications. URL: <https://mechanicalboost.com/steam-turbine-working-principle-types-and-applications/>
6. Steam Power Plant Configuration, Design, and Control. URL: https://web.ecs.baylor.edu/faculty/lee/ELC5362/Lecture%20note/H1-2015TPS_Review_Kwang.pdf
7. Steam Turbine Working Principle. URL: <https://www.triveniturbines.com/steam-turbine-working-principle-working-of-a-steam-turbine-steam-power-plant-working-principle-of-steam-turbine-steam-turbine-working-model-working-of-steam-turbine-power-plant/>
8. Steam Turbines. URL: <https://testbook.com/mechanical-engineering/steam-turbines>

Nalotov D.R., Liashenko O.S. COMPLEX TECHNOLOGICAL OBJECT CONTROL MODEL BASED ON FUZZY LOGIC METHODS

The paper considers the problem of improving the efficiency of controlling complex technological objects under conditions of variable parameters typical for modern industrial and energy systems. It is noted that the use of traditional approaches, particularly PID controllers, does not always provide the required adaptability and response speed to changes in technological process parameters, which justifies the feasibility of applying fuzzy logic methods for building more flexible and intelligent control systems. The object of the study is the process of controlling a turbine at a combined heat and power plant (CHP), which includes boilers, turbines, and auxiliary equipment operating under conditions of variable loads, temperature, and steam pressure. The subject of the research is adaptive control models based on fuzzy logic capable of taking into account the uncertainty of input data and forming flexible control decisions based on fuzzy rules. As part of the research, a mathematical control model was developed based on the use of fuzzification of input parameters, a system of fuzzy decision rules, and the defuzzification procedure for generating control signals. This approach makes it possible to transform precise values of technological process parameters, such as steam temperature and pressure, into fuzzy sets describing the system state in the form of linguistic variables such as “low”, “medium”, or “high”.

Special attention is paid to the formation of membership functions and the development of fuzzy control rules that consider the relationship between boiler temperature, steam pressure, and turbine load. To verify the effectiveness of the proposed model, computer simulations were carried out in the MATLAB environment using the Fuzzy Logic Toolbox module. During the simulation, the response of the control system to changes in the main technological parameters was studied, and the system behavior during fuel supply regulation depending on temperature and pressure was analyzed.

The obtained simulation results confirmed that the proposed fuzzy logic-based model makes it possible to increase the stability of equipment operation, reduce fluctuations in technological process parameters, and decrease the response time of the control system to changing operating conditions. In addition, the use of fuzzy logic contributes to reducing fuel consumption, improving energy efficiency, and decreasing the negative environmental impact of energy facilities. The proposed approaches can be used for modernization of control systems at energy enterprises and can also be adapted to other industrial systems operating under conditions of uncertainty and dynamically changing parameters.

Keywords: *fuzzy logic, adaptive control, CHP, fuzzification, system stability, turbine.*

Дата першого надходження статті до видання: 06.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 01.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті 11.05.2026