

МЕТОДИКА СИНТЕЗУ НЕЧІТКОЇ АДАПТИВНОЇ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ СКЛАДНИМ ОБ'ЄКТОМ

Відомо, що багато складних судових об'єктів, зокрема, парогенеруючі об'єкти, мають нелінійні характеристики, складні для моделювання динамічні елементи, неконтрольовані шуми і перешкоди, безліч зворотних і перехресних зв'язків та інші фактори, що ускладнюють реалізацію оптимальних систем автоматичного управління (САУ). За останні два десятиліття нові методи управління розвивалися на основі сучасної та класичної теорій управління. Як сучасна (зокрема, технології адаптивного і оптимального управління), так і класична теорія управління в значній мірі ґрунтувалися на ідеї лінеаризації систем. Однак, практично прийнятними до впровадження без подальшої адаптації можуть бути тільки об'єкти з лінійними параметрами і з низькою чутливістю до зовнішніх і внутрішніх збурень. Забезпечити цю якість для нелінійних судових об'єктів, які працюють в складних специфічних і часто несприятливих навігаційних умовах і на різних режимах в широкому діапазоні парового навантаження, розробникам, що використовують традиційні методи проектування САУ, досить складно, а з урахуванням всіх факторів і неможливо.

Через зазначені недоліки традиційних судових САУ, для підвищення їх ефективності при роботі в специфічних умовах, стає актуальним використання симбіозу традиційних і нових інтелектуальних технологій на основі апарату нечітких або нейро-нечітких систем, які успішно зарекомендували себе при роботі з промисловими складними об'єктами. В роботі запропонована методика синтезу нечіткої адаптивної САУ складним судовим об'єктом (паровим котлом), якій працює тривалий час зі зміною парового навантаження. Проведено моделювання запропонованої системи для трьох режимів роботи судового об'єкта та проведено оцінку показників якості адаптивної САУ.

Ключові слова: методика, синтез, система адаптивного управління, нечітка логіка, складний об'єкт.

Вступ та постановка проблеми. З початком 80-х років минулого століття в САУ починають експерименти з впровадження методів адаптивного управління, що використовують автоматичне налаштування параметрів регуляторів [1].

У таких системах повністю автоматичне налаштування може ініціюватися при настанні заздалегідь заданої умови, наприклад, при зміні навантаження, зміні зовнішніх впливів, зміні похибки регулювання, або безперервно в часі. Автоматичне налаштування, яке ініціюється без участі людини, називається адаптацією. Різновидом адаптації є розімкнене керування параметрами регулятора (табличне автоналаштування), коли заздалегідь знайдені параметри регулятора для різних умов роботи системи заносяться в таблицю, з якої вони витягуються при настанні умов, за якими ініціюється адаптація.

До недавнього часу вважалося, що регулятори, налаштовані в автоматичному режимі, зазвичай працюють менш ефективно, ніж ті, що налаштовані вручну. Пояснювалося це тим, що комп'ютер не може виконувати складні і погано формалізовані завдання краще за людину. Однак з розвитком методів теорії штучного інтелекту, особливо теорії нечіткої логіки, ситуація кардинально змінилася. Нечітка логіка дозволяє описувати знання та досвід експертів у галузі налагодження САУ та успішно застосовувати його на практиці у вигляді експертних систем. Отже, впровадження математичного апарату теорії нечіткої логіки в системи адаптивного управління складними судовими установками є актуальним науково-прикладним завданням.

Відомо, що суднові парові котли, як об'єкти управління, відрізняються широким різноманіттям за своїми конструктивними характеристиками і режимними параметрами, працюють в мінливих умовах навігаційної обстановки і зміні режимів роботи. Парове навантаження СПК в тривалих експлуатаційних режимах (стоянка с вантажними операціями, ходовий) знаходиться в межах 10 – 90 % від номінальної, а в режимах (швартування, аварійний режим, зйомка з якоря) може бути зменшене до 20 – 40 % від номінального. Також, на парове навантаження СПК впливає характер поточних технологічних процесів на судні, інтенсивність роботи силової установки, швидкість судна, район плавання та пора року і т.д. [2-4].

Відповідно, з урахуванням вищевикладеного, задача по розробці систем управління для СПК як об'єкту управління є складною і трудомісткою.

Таким чином, дослідження ефективності застосування методів теорії нечіткої логіки для адаптації судових САУ на прикладі параметрів судового парового котла є актуальним науково-прикладним завданням.

Аналіз останніх розробок і публікацій. В даний час є близько півсотні комерційних продуктів для налаштування ПД-регуляторів. У тому числі - Protuner фірми Techmation Inc., LabVIEW PID Control Toolset фірми National Instruments, Intelligent Tuner (Fisher-Rosemount), Profit PID (Honeywell) та інших [5, 6].

Переважає більшість програм використовує модель першого порядку із затримкою для опису об'єкта регулювання. Зв'язок з обладнанням виконується за допомогою OPC сервера SCADA.

У останніх версіях контролерів АВВ після ідентифікації в режимі релейного регулювання використовується додатковий етап ідентифікації за реакцією об'єкта на вхідний стрибок. У багатьох зарубіжних контролерах застосовується принцип табличного адаптивного управління, який використовується практично у всіх промислових контролерах інших виробників.

Дані для введення в таблицю отримуються шляхом виконання процедури автоналаштування для необхідних режимів роботи об'єкта.

Методи адаптації ПД-регуляторів, що описані вище, мають не оптимальні показники якості при керуванні нелінійними та складними системами, за недостатньої інформації про об'єкт управління або в разі неможливості проведення активної ідентифікації через умови виробництва. Характеристики типових регуляторів у таких випадках можна покращити за допомогою методів нечіткої логіки. Нечітке управління, як правило, застосовується для складних об'єктів, що функціонують в умовах невизначеності. Такі об'єкти піддаються частим змінам збурюючих впливів, що ускладнює ефективність традиційних алгоритмів, але при цьому досить успішно керуються досвідченими операторами в режимі дистанційного управління. Для розробки нечіткої системи адаптивного управління автори пропонують методику синтезу нечіткої адаптивної САУ, яка складається з етапів, представлених нижче.

Розробка математичної моделі контуру управління за допомогою методів параметричної ідентифікації у програмі System Identification Toolbox. Під час роботи у програмі було виконано наступні етапи процесу параметричної ідентифікації (рис. 1 - 9):

На певному етапі було здійснено введення експериментальних даних та побудовано графіки експериментальних залежностей (рис. 1 – 3).

Завдання параметричної ідентифікації зводиться до пошуку таких значень параметрів моделі, які забезпечують найбільшу близькість значень на виході, розрахованих за моделлю та отриманих в експерименті, при однаковому значенні вхідних даних.

Як критерій оцінки моделі або її точності використовується середньоквадратичне відхилення.

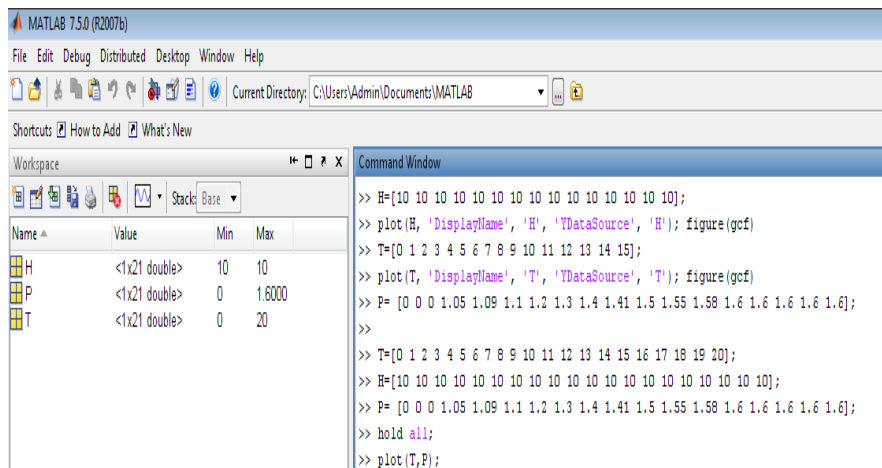


Рисунок 1 – Програма для введення вихідних даних за допомогою командного рядка (година, тиск, положення паливного клапана)

Експериментальна крива розгону показана на рис. 2.



Рисунок 2 – Експериментальна крива розгону тиску пари суднового парового котла Mitsubishi MAC 60 при номінальному паровому навантаженні

Графічна залежність положення паливного клапана представлена на рис.3.

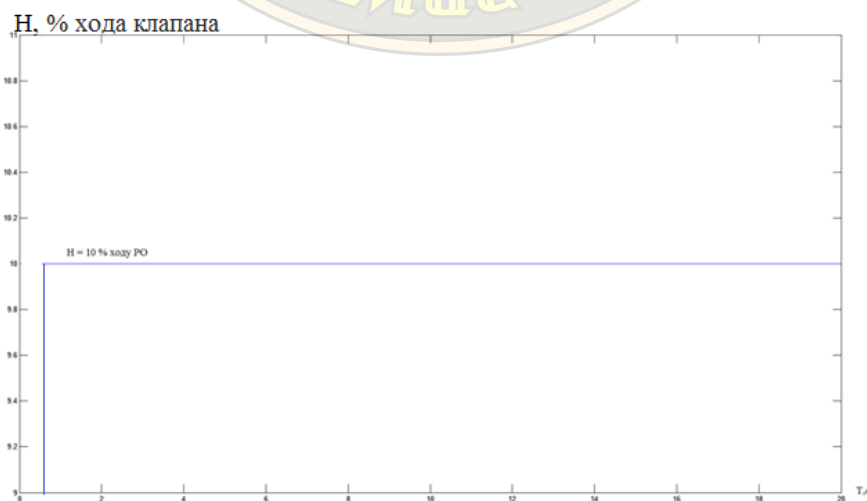


Рисунок 3 – Графік положення регулюючого органу (клапану)

Процес завантаження експериментальних даних представлений на рис. 4.

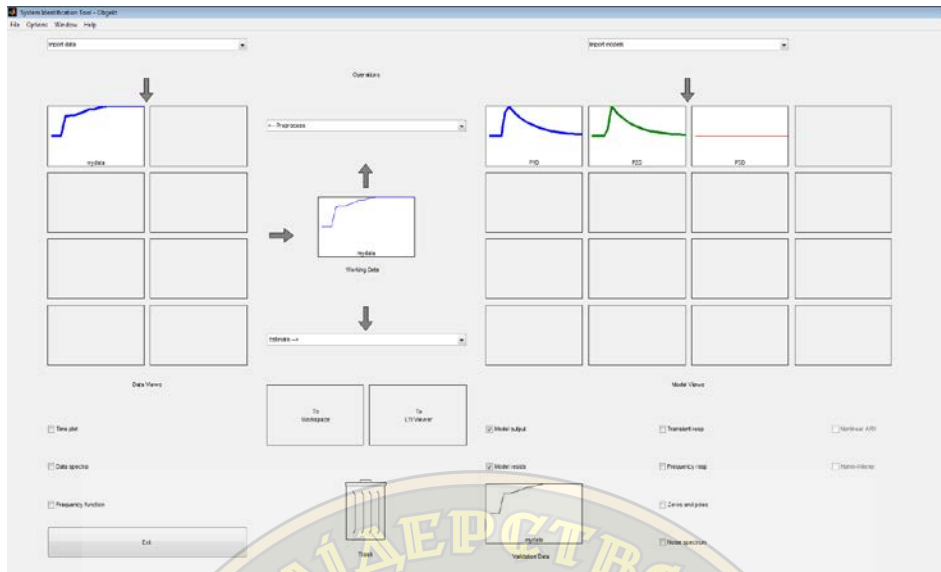


Рисунок 4 – Процес завантаження експериментальних даних у програму параметричної ідентифікації

Процеси розрахунку значень параметрів моделі першого порядку та порівняльні характеристики експериментальних та модельних даних показані на рис. 5–7.

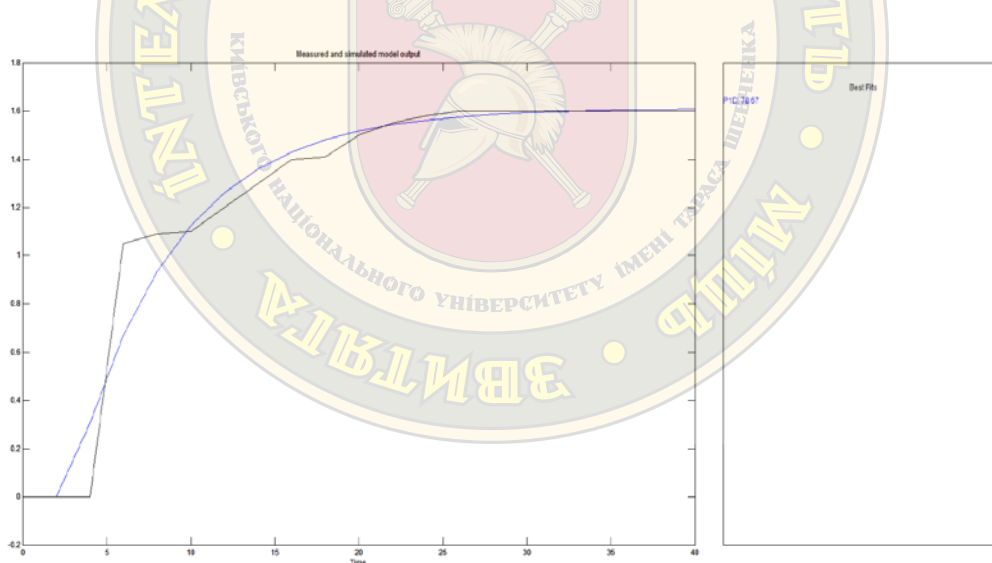


Рисунок 5 – Порівняльний аналіз даних експерименту і моделі (ступінь адекватності моделі = 78 %)

Значення математичної моделі (передавальної функції інерційної ланки першого порядку зі ланкою запізнення) показано на рис. 6.

```

Process model with transfer function
      K
G(s) = ----- * exp(-Td*s)
      1+Tp1*s
with K = 0.16113
      Tp1 = 6.0812
      Td = 3.3345
Estimated using PEM from data set mydata
Loss function 0.0150315 and FPE 0.020042

```

Рисунок 6 – Розраховані значення математичної моделі

Перегляд значень авторегресії та середньоквадратичного відхилення можна побачити на (рис.7).

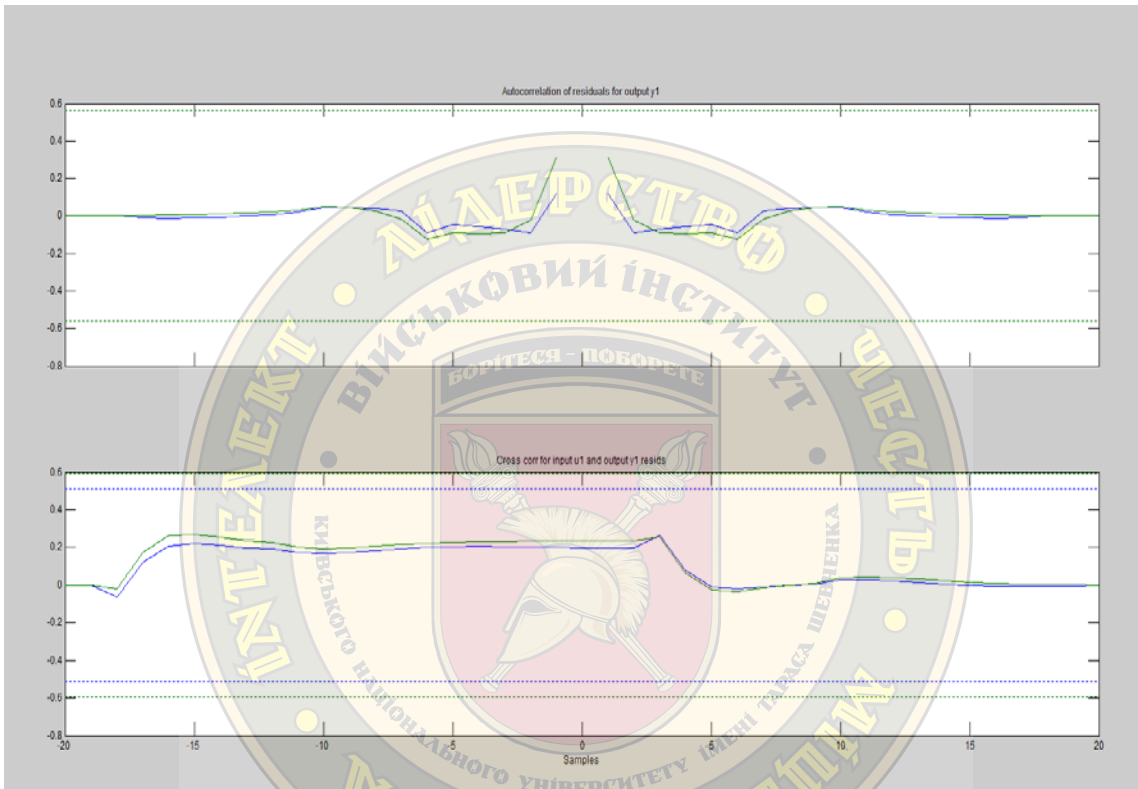


Рисунок 7 – Квадратичні відхилення модельних даних від експериментальних

Для аналізу можливості підвищення ступеню точності моделі проводився другий експеримент на вибір порядку моделі. Розрахункові дані (математична модель) показані на рис. 8.

```

Process model with transfer function
      K
G(s) = ----- * exp(-Td*s)
      (1+Tp1*s)(1+Tp2*s)
with K = 0.16
      Tp1 = 5.4866
      Tp2 = 0.001
      Td = 3.8119
Estimated using PEM from data set mydata
Loss function 0.0164434 and FPE 0.0241814

```

Рисунок 8 – Розрахункові значення передавальної функції інерційної ланки другого порядку з ланкою запізнення

Порівняльний аналіз показника адекватності (точність моделі) за двома моделями та експериментом показаний на рис.9.

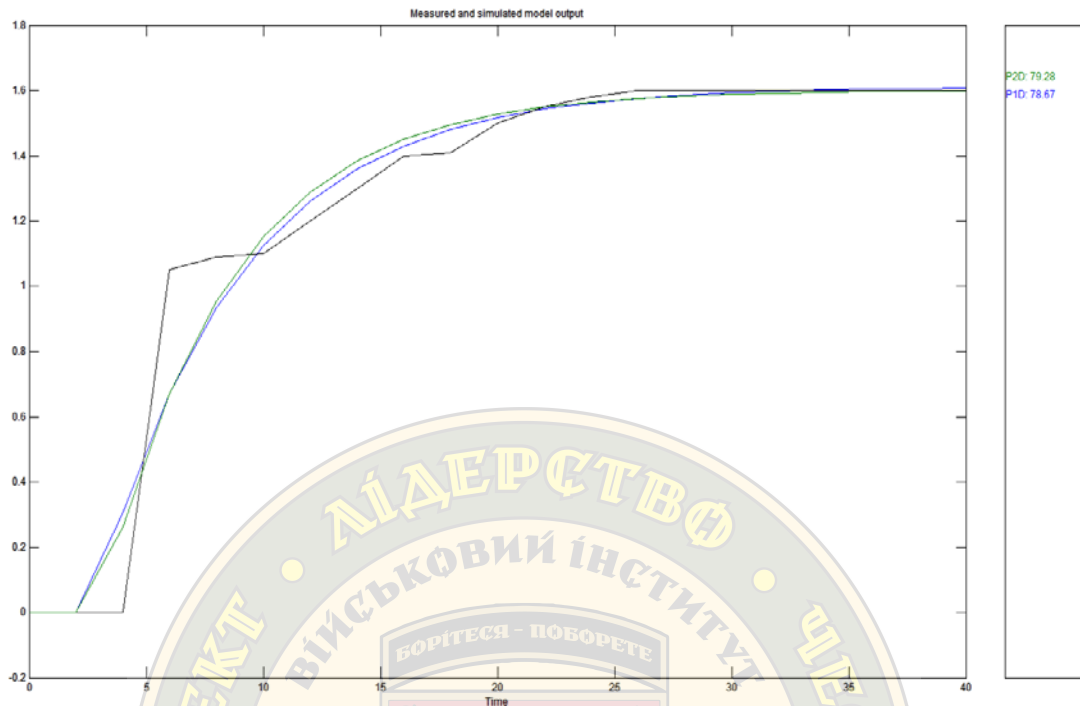


Рисунок 9 – Графічні залежності, що відображають експериментальні дані за допомогою запропонованих математичних моделей. (Ступінь адекватності моделі другого порядку 80%.)

Модель третього порядку виявилася зі значенням точності 70%, тобто гірше. Таким чином, на підставі порівняльного аналізу було обрано математичну модель другого порядку у вигляді інерційної ланки з ланкою запізнення. Модель добре відображає експеримент і може бути використана для подальших розрахунків параметрів ПД – регуляторів у САУ тиску пари судових котлів.

Вибір структури та алгоритму нечіткої системи адаптації параметрів ПД – регулятора. Як структуру адаптивного САУ запропонована система нечіткої адаптації ПД – регулятора (рис.10) [7]. На вхід нечіткого адаптера (нечіткої експертної системи, що діє за алгоритмом Мамдані) подаються параметри математичної моделі об'єкта, а вихідними даними є оптимальні налаштування ПД - регулятора. Налаштування параметрів регулювання може бути автоматичним, за допомогою блоку нечіткої логіки Блок нечіткої логіки (фаззі-блок) використовує базу правил налаштування та методи нечіткого виведення. Фаззі-налаштування дозволяє зменшити перерегулювання, знизити час встановлення та підвищити робастність ПД-регулятора. Процес автоналаштування регулятора за допомогою блоку нечіткої логіки починається з пошуку початкових наближень коефіцієнтів регулятора. Це робиться шляхом Циглера-Нікольса, з періоду своїх коливань у замкнутій системі і петльового посилення. Далі формується критеріальна функція, необхідна для пошуку оптимальних значень параметрів налаштування методами оптимізації [7].

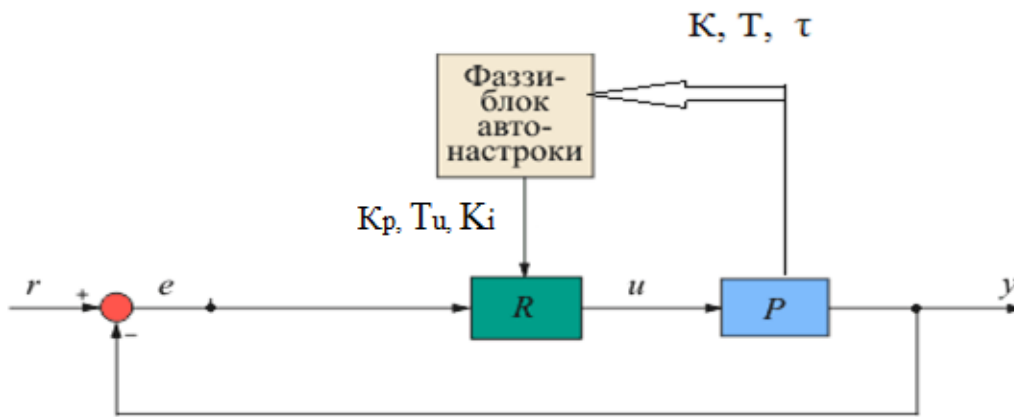


Рисунок 10 - Структура ПД-регулятора з блоком автоналаштування на основі нечіткої логіки: R – ПД – регулятор, P – об’єкт управління

Автоналаштування ПД-регулятора дозволяє автоматизувати процес вибору оптимальних параметрів, щоб забезпечити стабільну роботу системи за зміни зовнішніх умов або характеристик об’єкта управління.

Етап створення нечіткої адаптивної системи в редакторі Fuzzy Logic Toolbox.

Спочатку обирають діапазони вхідних та вихідних сигналів блоку автоналаштування, форму функцій належності шуканих параметрів, правила нечіткого виведення, механізм логічного виведення, метод дефазифікації та діапазони масштабних множників, необхідних для перерахування чітких змінних у нечіткі. Параметри моделі обираються з урахуванням даних спостережень які були отримані на попередньому етапі.

Вхідні дані – параметри математичної моделі (передавальної функції з ланкою затримки), які знаходяться у діапазоні в залежності від навантаження складного об’єкта: K – коефіцієнт посилення (0.3 – 1.5); T – постійна часу (1 – 10); T_{au} – запізнення (0.1 – 1).

Виходи адаптивного налаштування ПД – регулятора: K_p – коефіцієнт пропорційності; K_i – коефіцієнт диференціювання; T_u – постійна інтегрування (рис.11).

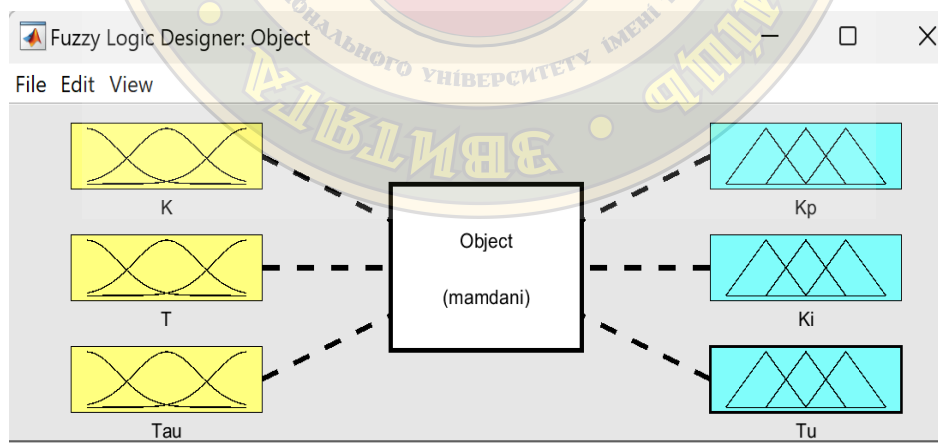


Рисунок 11 – Редактор налаштування вхідних та вихідних параметрів нечіткої адаптивної САУ у середовище Fuzzy Logic Toolbox

Після створення загальної структури у редакторі «Membership Function» здійснюють введення значень необхідних параметрів та типу функції належності (рис.12 - 13).

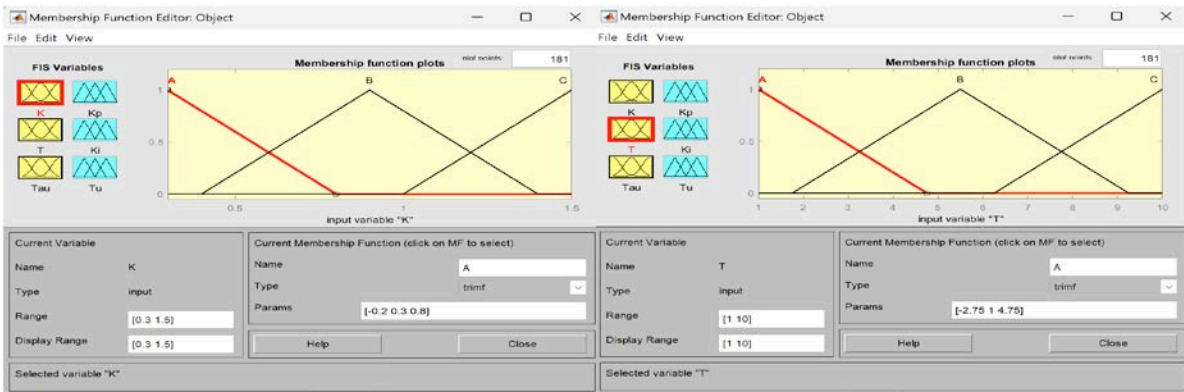


Рисунок 12 – Функції належності вхідних змінних K, T, T_{au}

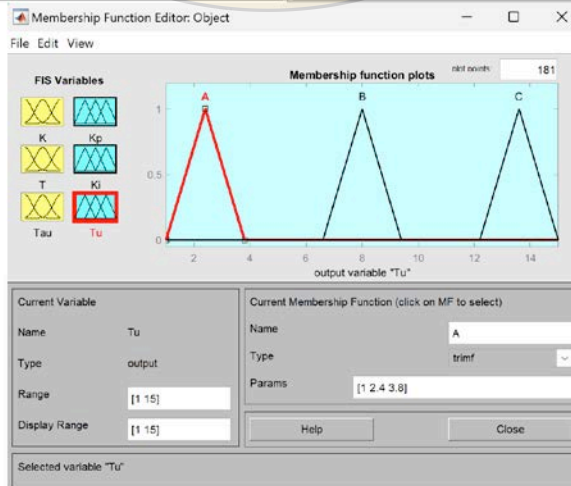
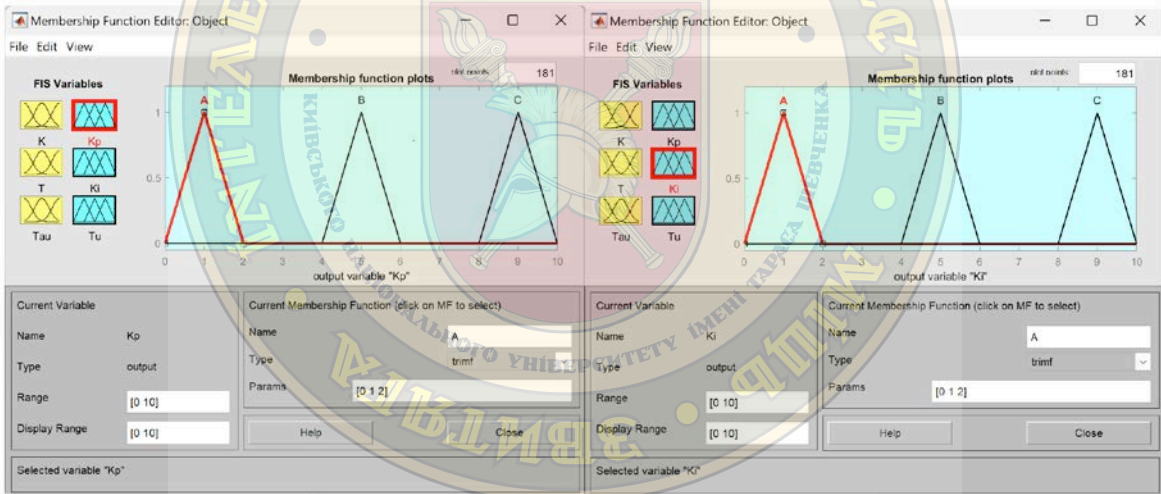
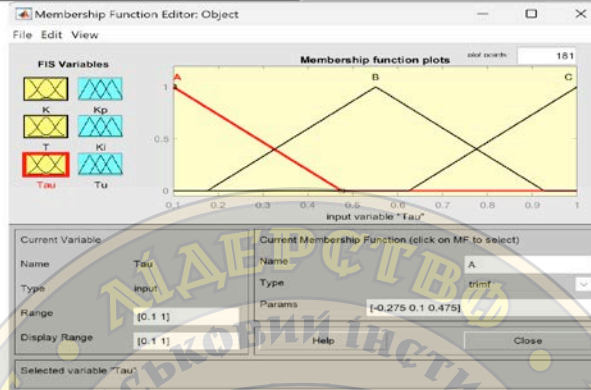


Рисунок 13 – Функції належності вихідних змінних K_p , K_i , T_u

Далі процес розробки правил роботи бази знань на основі досвіду експерта по ручному налаштуванню контролерів САУ. Для цього використовується меню «Rule Editor» (рис.14)

Деякі правила за якими буде працювати експертна адаптивна система:

- 1) Якщо $(K, T, T_{au} = A)$ тоді $(K_p = C)(K_i = A)(T_u = B)$;
- 2) Якщо $(K, T, T_{au} = B)$ тоді $(K_p = A)(K_i = B)(T_u = C)$;
- 3) Якщо $(K, T, T_{au} = C)$ тоді $(K_p = C)(K_i = A)(T_u = B)$.

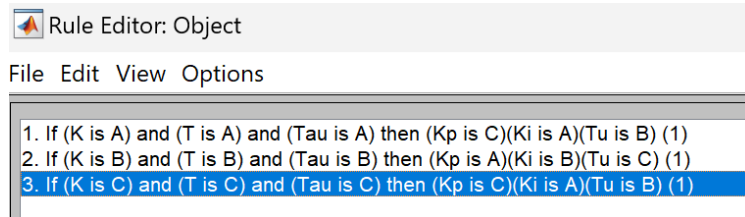


Рисунок 14 – Фрагмент правил за якими працює нечітка адаптивна система

Приклад роботи програми продемонстровано на (рис. 15 - 16). Для відображення залежності вихідної змінної від вхідних можна отримати поверхню відгуку при відповідному виборі меню, також при цьому можна задати параметр відображення.

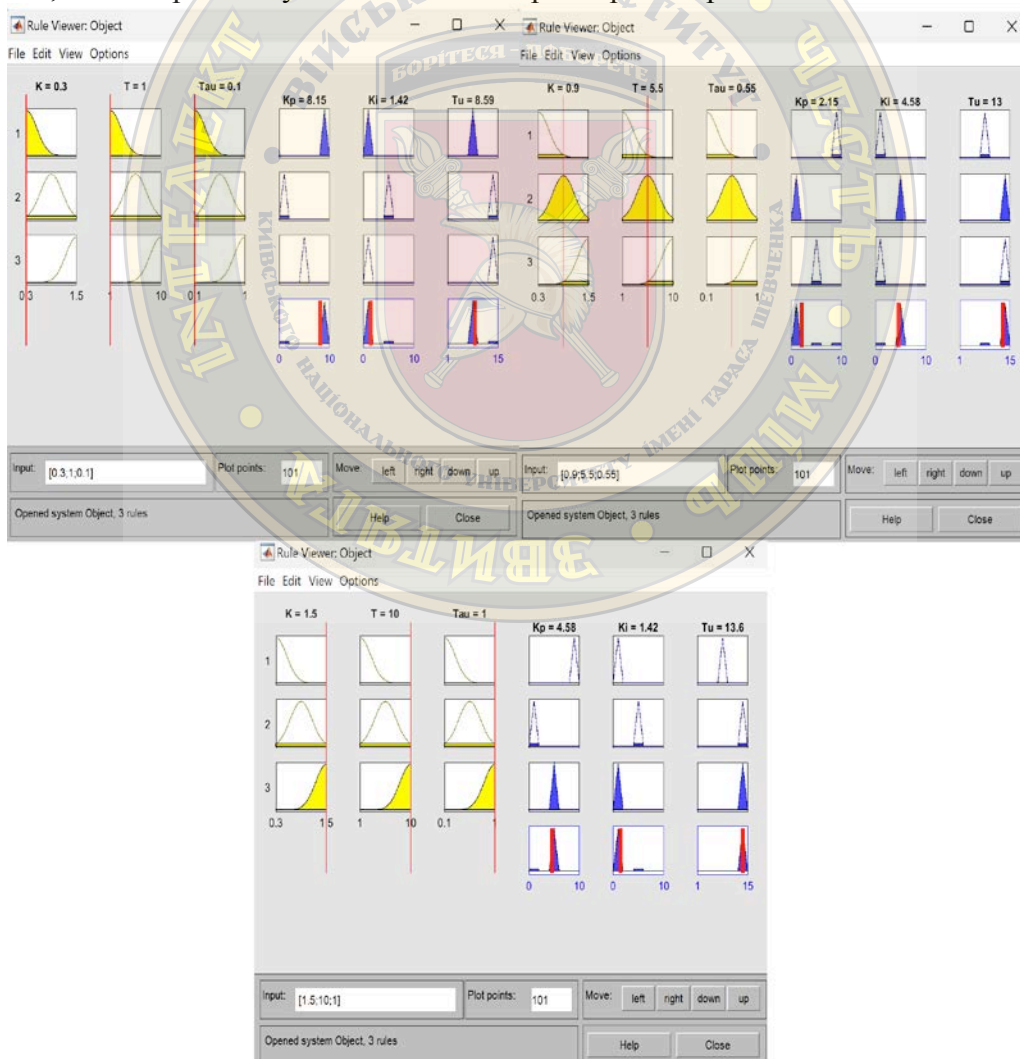


Рисунок 15 – Принцип роботи програми при (мінімальних, середніх, максимальних) вхідних параметрах та відповідно отримані оптимальні налаштування

ПІД – регулятора САУ тиску пари

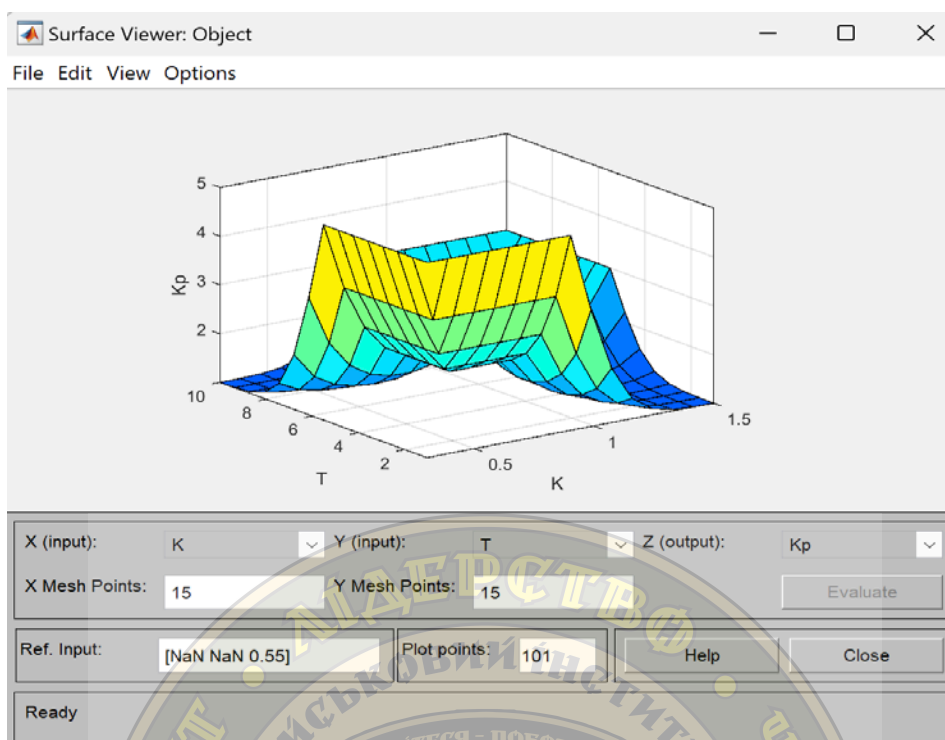


Рисунок 16 – Поверхня відгуку нечіткої системи

Моделювання нечіткої адаптивної системи у програмі SimuLink. За допомогою редактора Simulink промодельовано поведінку системи з ПІД-регулятором і перевірено, як змінюється перехідний процес при різних математичних моделях.

У моделі САУ (рис. 17) використані наступні елементи:

- Task: завдання чи вхідна величина.
- Суматор: блок підсумовування, де обчислюється помилка як різниця між вхідним сигналом та виходом системи.
- Controller: пропорційно-інтегрально-диференціальний (PID) контролер, який керує сигналом регулювання.
- Valve/Drive: підсилювальний блок (може представляти привід або клапан).
- Object: об'єкт управління з функцією передавання
- Delay: блок затримки.
- Out: вихід системи (сигнал на виході).

Елементи об'єднані в систему із зворотним зв'язком, де вихід впливає на роботу PID контролера через суматор.

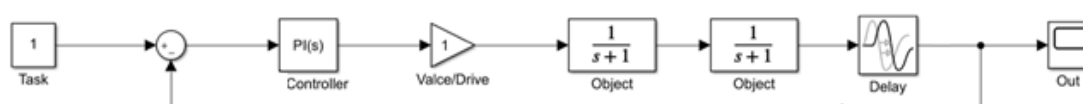


Рисунок 17 – Загальна модель системи управління у програмі Simulink (MatLab)

Вхідні параметри передавальних функцій, які відображають три навантажувальних режими роботи суднового парового котла (мінімальний, середній, максимальний):

- Мінімальні: $K = 0.3$, $T = 1$, $T_{au} = 0.1$;

- Середні: $K = 0.9$, $T = 5$, $T_{au} = 0.5$;
- Максимальні: $K = 1.5$, $T = 10$, $T_{au} = 1$;

Перехідні процеси адаптивної САУ показано на рис. 18.

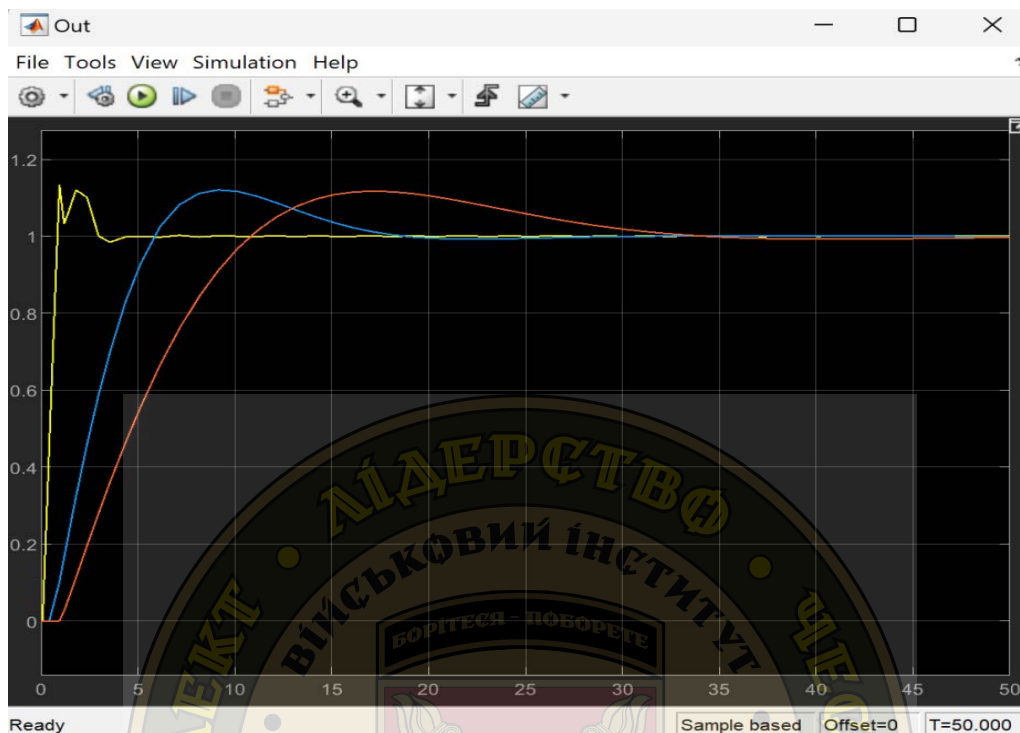


Рисунок 18 – перехідні процеси трьох режимів роботи суднового об'єкта управління по каналу завдання після нечіткого адаптивного налаштування ПІД - регулятора

Аналіз показників якості перехідних процесів адаптивної САУ (рис.18) показав бажаний аперіодичний тип, відсутність помилки регулювання та регламентований час регулювання. Таким чином, запропонована методика успішно реалізує ефективну адаптацію суднової САУ.

Висновки та перспективи подальших досліджень. Адаптація ПІД - регуляторів за допомогою нечітких експертних систем виключає необхідність ручного налаштування, що не тільки заощаджує час, а й мінімізує людські помилки, які можуть виникнути при спробах налаштування системи вручну. Це особливо критично у промислових процесах, де неправильне налаштування може призвести до суттєвих втрат або збоїв у роботі обладнання.

У разі ПІД -регуляторів нечітка логіка може використовуватися для:

- аналізу показників якості перехідних процесів та їх змін;
- прийнятті рішень про коригування коефіцієнтів регулятора залежно від стану системи управління;
- автоматичної адаптації та оптимізації параметрів регулятора в режимі реального часу при зміні динаміки системи.

Переваги експертних систем автоналаштування:

- адаптивність: експертна система може адаптуватися до змін умов роботи системи без необхідності втручання оператора;
- гнучкість: використання нечіткої логіки дозволяє гнучкіше реагувати на зміни параметрів об'єкта керування в умовах невизначеності та наявності досвіду експерта;
- оптимізація якості управління: автоматичне налаштування ПІД - регулятора знижує статичну помилку, підвищує стійкість та точність системи.

Таким чином, впровадження нечітких адаптивних САУ у технологічні процеси складних об'єктів, на приклади суднових теплових агрегатів може суттєво покращити показники якості перехідних процесів.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Åström, K.J., Wittenmark, B. Computer controlled systems, theory and design. Prentice-Hall, Englewood Cliffs [Електроний ресурс] 2018. Режим доступу: <https://bayanbox.ir/view/8821671619590593184/Adaptive-Control-Astrom-2nd-edition.pdf>.
2. Mikhailenko, V.S., Kharchenko, R. Yu. Analysis of traditional and neuro-fuzzy adaptive system of controlling the primary steam temperature in the direct flow steam generators in TPS / *Automatic Control and Computer Sciences*, 2014, Vol. 48, No. 6, pp. 334–344. doi: 10.3103/S0146411614060066.
3. Mikhailenko, V.S., Kharchenko, R.Yu., Shcherbinin, V.A., Leshchenko, V.V. Using Neural Network Technologies to Simulate the Working Processes of Ship Steam Boilers. *Information Resources CEUR Workshop Proceedings* this link is disabled, urn:nbn:de:0074-3126-7, 2021, 3126, pp. 367–373.
4. Li, Y., Ang, K.H, Chong, G.C.Y. Patents, Software, and Hardware for PID control. An overview and analysis of the current art / *IEEE Control Systems Magazine*. 2006. 142 p.
5. Kharchenko, R. Y., Kochetkov, A. V., Mikhaylenko, V. S. ANALYSIS OF METHODS FOR AUTOMATED RESEARCH OF DC VOLTAGE CONVERTERS OF MODULAR STRUCTURE / *Radio Electronics, Computer Science, Control*. 2022. (3), 7. <https://doi.org/10.15588/1607-3274-2022-3-1>.
6. Kharchenko, R. Yu., Mykhailenko, V. S., Kochetkov, A. V. Development of a Neuro-Fuzzy Intelligent Network for Monitoring and Control of Microclimate Systems / *Automatic Control and Computer Sciences*. 2023. 57(1), 27–36. <https://doi.org/10.3103/s0146411623010066>.
7. Xiangjie, L., Felipe, L.-R. Generalized Minimum Variance Control of Steam-Boiler Temperature using NeuroFuzzy Approach / *Proceedings of the 5th World Congress on Intelligent Control and Automation, Hangzhou, P.R. China, June 15 – 19, 2018.* – P. 134 – 148.

REFERENCES:

1. Åström, K.J., Wittenmark, B. (2018), “Systemy z komp'yuternym keruvannyam, teoriya ta proektuvannya. Prentis-Kholl, Enhlvuds'ki skeli” [Computer controlled systems, theory and design. Prentice-Hall, Englewood Cliffs], (<https://bayanbox.ir/view/8821671619590593184/Adaptive-Control-Astrom-2nd-edition.pdf>).
2. Mikhailenko, V.S., Kharchenko, R. Yu. (2014), “Analysis of traditional and neuro-fuzzy adaptive system of controlling the primary steam temperature in the direct flow steam generators in TPS”, *Automatic Control and Computer Sciences*, Vol. 48, No. 6, pp. 334–344. doi: 10.3103/S0146411614060066.
3. Mikhailenko, V., Kharchenko, R., Shcherbinin, V., Leshchenko, V. (2021), “Using Neural Network Technologies to Simulate the Working Processes of Ship Steam Boilers”, *Information Resources CEUR Workshop Proceedings* this link is disabled, urn:nbn:de:0074-3126-7, 2021, 3126, pp. 367–373.
4. Li, Y., Ang, K.H, Chong, G.C.Y. (2006), “Patents, Software, and Hardware for PID control. An overview and analysis of the current art”, *IEEE Control Systems Magazine*. 2006. 142 p.
5. Kharchenko, R. Y., Kochetkov, A. V., Mikhaylenko, V. S. (2022), “Analysis of methods for automated research of dc voltage converters of modular structure”, *Radio Electronics, Computer Science, Control*, (3), 7. <https://doi.org/10.15588/1607-3274-2022-3-1>.
6. Kharchenko, R. Yu., Mykhailenko, V. S., Kochetkov, A. V. (2023), “Development of a Neuro-Fuzzy Intelligent Network for Monitoring and Control of Microclimate Systems”, *Automatic Control and Computer Sciences*, 57(1), 27–36. <https://doi.org/10.3103/s0146411623010066>.
7. Xiangjie, L., Felipe, L.-R. (2018), “Generalized Minimum Variance Control of Steam-Boiler Temperature using NeuroFuzzy Approach”, *Proceedings of the 5th World Congress on Intelligent Control and Automation, Hangzhou, P.R. China, June 15 – 19, 2018.* – P. 134 – 148.

METHODOLOGY FOR SYNTHESIZING A FUZZY ADAPTIVE CONTROL SYSTEM FOR A COMPLEX OBJECT

It is known that many complex maritime systems, particularly steam-generating units, exhibit nonlinear characteristics, complex dynamic elements that are challenging to model, uncontrolled noise and disturbances, numerous feedback and cross-links, and other factors that complicate the implementation of optimal automatic control systems (ACS). Over the past two decades, new control methods have been developed based on modern and classical control theories. Both modern (including adaptive and optimal control technologies) and classical control theories have largely relied on the concept of system linearization. However, in practice, only systems with linear parameters and low sensitivity to external and internal disturbances can be feasibly implemented without further adaptation. Ensuring this quality for nonlinear maritime systems, which operate under complex, specific, and often adverse navigation conditions and across various operating modes within a broad range of steam loads, is highly challenging for developers using traditional ACS design methods, and, considering all factors, it is impractical.

Due to these limitations of traditional maritime ACS, enhancing their efficiency in specific operating conditions necessitates the integration of traditional and new intelligent technologies based on fuzzy or neuro-fuzzy systems, which have proven successful in handling complex industrial systems. This paper proposes a synthesis methodology for a fuzzy adaptive ACS for complex maritime systems (specifically, a steam boiler), designed to operate over extended periods under varying steam loads. Modeling of the proposed system was conducted for three operating modes of the maritime unit, with quality metrics for the adaptive ACS evaluated.

Keywords: methodology, synthesis, adaptive control system, fuzzy logic, complex system.