

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ОДЕСЬКА МОРСЬКА АКАДЕМІЯ»
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ АВТОМАТИКИ ТА
ЕЛЕКТРОМЕХАНІКИ

Кафедра Електрообладнання і автоматики суден

ДИПЛОМНА РОБОТА МАГІСТРА

на тему

**Інтелектуальна система контролю режиму горіння палива в
суднових котлах**

Виконав: здобувач другого (магістерського) рівня
вищої освіти, групи 3601

Спеціальність:

271 - Морський та внутрішній водний транспорт
(шифр і назва спеціальності)

Спеціалізація: "Експлуатація суднового
електрообладнання і засобів автоматики"

ВДОВИЦЯ ОЛЕГ АНДРІЙОВИЧ

(підпис, прізвище та ініціали)

допущений до захисту 10.12.2025

(дата малого захисту)

Завідуючий кафедрою Ірина ГВОЗДЕВА

(підпис, прізвище та ініціали)

Керівник Владислав МИХАЙЛЕНКО

(підпис, прізвище та ініціали)

Нормоконтролер В. Мехасенко

(підпис, прізвище та ініціали)

Рецензент В. Захарченко

(підпис, прізвище та ініціали)

Одеса 2025

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ОДЕСЬКА МОРСЬКА АКАДЕМІЯ»
Навчально-науковий інститут автоматики та електромеханіки

Кафедра Електричної інженерії та електроніки

Освітньо - кваліфікаційний рівень магістр

Спеціальність 271 Річковий та внутрішній водний транспорт

**Спеціалізація 271.03 Експлуатація суднового електрообладнання і засобів
автоматики**

Затверджую
 Зав. кафедрою І.Г.Гвоздева
 „10” 12 2025 р.

**ЗАВДАННЯ
 ДО ДИПЛОМНОЇ РОБОТИ КУРСАНТА**

Вдовиця Олег Андрійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи **Інтелектуальна система контролю режиму горіння
палива в судових котлах**

Керівник роботи Владислав МИХАЙЛЕНКО., д.т.н., професор
 (прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по академії від „10” 12 2025 року № 1503

2. Строк подання курсантом закінченої роботи 9.12.2025
3. Вихідні дані до роботи: судно контейнеровіз водотоннажністю 50714;
судновий допоміжний паровий котел Mitsubishi марки МАС парове виробництво
6 тон/год, тису пари 1,6 МПа; суднова система моніторингу Aconis 2000.
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, що підлягають
розробці) аналіз умов експлуатації судових парових котлі, розробка
математичної моделі системи регулювання витрати повітря; розробка
програмного алгоритму інтелектуального регулятора САУ горіння палива;
імітаційне моделювання та дослідження ефективності інтелектуальної САУ
горіння.
5. Перелік графічного матеріалу (з точними вказівками обов'язкових креслень).
Презентація зі слайдами які відображають актуальність роботи, мету,
гепотизу, наукову новизну, висновки та етапи розробки системи
нейромережевої САУ горіння палива у топки котла.

6. Консультанти по роботі, з вказівками розділів роботи, що до них відносяться

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис і дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ОБ'ЄКТУ	Владислав МИХАЙЛЕНКО., проф. каф ЕОіАС	10.09.	10.11
РОЗРОБКА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ СИСТЕМИ КОНТРОЛЯ ТА УПРАВЛІННЯ ПРОЦЕСОМ ГОРІННЯ ПАЛИВА	Владислав МИХАЙЛЕНКО., проф. каф ЕОіАС	16.10	10.12



КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітки
1	КОНСТРУКТИВНІ ОСОБЛИВОСТІ СУДНА ОГРУНТУВАННЯ ТЕМИ	1.11-5.11	Век
2		5.11 – 10.11	Век
3	РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛИ ПРОЦЕСА КОНТРОЛЯ ЯКОСТІ ГОРІННЯ	10.11-3.12	Век
4	МОДЕЛЮВАННЯ САУ ГОРІННЯ ПАЛИВА	3.12 – 10.12	Век

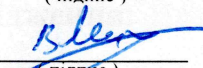
Курсант-дипломник


 (підпис)

Олег ВДОВИЦЯ

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи


 (підпис)

Владислав МИХАЙЛЕНКО

(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Дипломна робота магістра: 77 с., 37 рис., 7 табл.,
20 джерел

Тема: «Удосконалення нечіткої системи адаптації регуляторів суднового парового котла»

Гіпотеза дослідження: впровадження методів и алгоритмів інтелектуального управління режимами горіння рідкого палива в судових парових котлах може дозволити підвищити їх екологічні та економічні показники роботи.

Метою роботи є розробка інтелектуальної системи контролю ефективності процесу горіння рідкого палива в топках судових допоміжних парових котлів.

Завдання дослідження:

- провести огляд сучасних методів та алгоритмів контролю ефективності процесу горіння у САУ парових котлів;
- провести аналіз процесів горіння рідкого палива (дизель, мазут) та розробити математичну модель об'єкта;
- розробити інтелектуальну систему контролю та оптимізації режимів горіння за показниками економічності;
- провести моделювання адаптивної САУ процесом подачі повітря і оцінити її ефективність при зміні навантаження суднового котла.

Об'єкт дослідження: процеси горіння рідкого палива у судових парових котлах

Предмет дослідження: математичні моделі та алгоритми системи інтелектуального контролю режимів горіння рідкого палива.

Методи дослідження: парметричної ідентифікації; теорії нечіткої логіки; математичного та комп'ютерного моделювання.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в наступному:

- розроблено математичну модель контуру САУ «витрата палива – зміст кісню у димових газах» в топки суднового парового котла Mitsubishi з базовою паровою продуктивністю 16 тонн пари на годину. Модель відображає експериментальні дані з високим ступенем адекватності.
- удосконалена інтелектуальна система контролю режимів горіння яка дозволяє вибрати оптимальний коефіцієнт надлишку повітря в САУ суднового допоміжного котла в залежності від кольору пламені горілки та характеру полум'я .

Практична цінність. Отримані результати можуть застосовуватися в САУ горіння палива в основних та допоміжних суднових парових котлів на морських і річкових суднах.

В ході виконання роботи отримано:

- програмний продукт на мові пайтон який дає оцінку ефективності процесу горіння рідкого палива в топки суднового парового котла в залежності від інформації оператора.

Апробація результатів. Результати роботи було розглянуто на міжнародній науково-технічній конференції «СУДНОВА ЕЛЕКТРОІНЖЕНЕРІЯ, ЕЛЕКТРОНІКА І АВТОМАТИКА» (CEIEA-2024) НУ «ОМА» – 2024. “INTERNATIONAL STUDENTS SCIENTIFIC WORKSHOP” Constanta Maritime University - 2025.

“ІННОВАЦІЇ ТА ТЕХНОЛОГІЇ НА МОРСЬКОМУ ТА ВНУТРІШНЬОМУ ТРАНСПОРТІ ”- НУ”ОМА”- 2025.

СУДНОВИЙ ДОПОМІЖНИЙ ПАРОВИЙ КОТЕЛ, МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ, ГОРІННЯ ПАЛИВА, СИСТЕМА ІНТЕЛЕКТАЛЬНОГО КОНТРОЛЮ

ABSTRACT

Master's thesis: 77 p., 37 fig., 7 table, 20 sources

Topic: “Improving the fuzzy adaptation system of ship steam boiler regulators”

Research hypothesis: the advancement of methods and algorithms for intelligent control of liquid fuel combustion modes in ship steam boilers can improve their environmental and economic performance indicators.

The method of work is the development of an intelligent system for monitoring the efficiency of the rare combustion process in the furnaces of ship auxiliary steam boilers.

Investigation department:

- conduct an examination of current methods and algorithms for monitoring the efficiency of the combustion process at automatic control systems for steam boilers;
- analyze the combustion processes of rare fuels (diesel, fuel oil) and develop a mathematical model of the object;
- develop an intelligent system for monitoring and optimizing burner modes based on economic indicators;
- carry out modeling of the configured ACS and evaluate its effectiveness when changing the thermal supply of a ship's boiler.

Object of investigation: automatic control system for the combustion process of a ship's steam boiler.

Subject of research: mathematical models and algorithms for the system of intelligent control of stove modes.

Investigation methods: parametric identification; navchannya neuromerezh; fuzzification of input parameters; modeling

The scientific novelty of the obtained results lies in the present:

- a mathematical model was developed for the circuit of the self-propelled gun system for burning rare fires in the furnaces of a Mitsubishi ship steam boiler with a base

steam productivity of 16 tons of steam per year. The model reflects experimental data with a high level of adequacy;

- the intelligent system for monitoring the combustion modes has been improved, allowing one to evaluate the excess wind coefficient of the ship's auxiliary boiler.

Practical value. The results can be obtained in the ACS of the mining fire in the main and additional ship steam boilers on sea and river vessels.

During the work, the following was obtained:

- a software product in Python that provides an assessment of the efficiency of the liquid fuel combustion process in the furnaces of a ship's steam boiler, depending on the operator's information.

Testing the results. The results of the work were reviewed at the international scientific and technical conference “SHIP ELECTRICAL ENGINEERING, ELECTRONICS AND AUTOMATION” (SEIEA-2024) NU “OMA” - 2024.

“INTERNATIONAL STUDENTS SCIENTIFIC WORKSHOP” Constanta Maritime University - 2025p.«INNOVATIONS AND TECHNOLOGIES IN MARITIME AND INLAND WATER TRANSPORT» NU “OMA” - 2025.

SHIP AUXILIARY STEAM BOILER, MATHEMATICAL MODEL, FUEL COMBUSTION, INTELLECTUAL CONTROL SYSTEM

ЗМІСТ

Перелік скорочень.....	10
ВСТУП.....	11
1.ОГЛЯД НАУКОВОЇ ЛІТЕРАТУРИ З ТЕМАТИКИ ДОСЛІДЖЕННЯ	13
1.1 Аналіз наукових публікацій у галузі систем контролю процесів горіння палива у парових котлах.....	13
1.2 Опис конструктивних характеристик судна и обладнання агрегатів СЕУ.....	15
2. РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ОБ'ЄКТУ УПРАВЛІННЯ.....	19
2.1. Огляд сучасних методів контролю та управління процесами горіння рідкого палива у промислових та суднових парових котлів.....	19
2.2. Дослідження процесів горіння рідкого палива в суднових парових котла...	27
2.3. Проведення парметричної ідентифікації контуру системи управління СПК.....	30
3. РОЗРОБКА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ ЕФЕКТИВНОСТІ ПРОЦЕСУ ГОРІННЯ	44
3.1. Вибір математического апарата.....	44
3.2. Удосконалення структури САУ процесу горіння.....	49
3.3. Розробка нечіткої експертної системи для контролера подачі повітря.....	55
4. МОДЕЛЮВАННЯ НЕЧІТКОЇ АДАПТИВНОЇ СИСТЕМИ РЕГУЛЮВАННЯ КОЕФІЦІЄНТА НАДЛІШКУ ПОВІТРЯ	61
4.1. Розробка адаптивної САУ.....	61
4.2. Апробація адаптивної нечіткої САУ.....	64
ВИСНОВКИ.....	69
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ.....	71
Додаток А.....	74
Додаток В.....	75

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

БЗ – база знань

ДПК - допоміжний паровий котел

ЕС – експертна система

САУ - система автоматичного управління

СЕУ – суднова енергетична установка

ККД - коефіцієнт корисної дії

НА – нечіткий адаптер

ВСТУП

Розвиток сучасного морського транспорту дедалі більше орієнтується на створення автономних суден нового покоління, здатних функціонувати з мінімальним втручанням людини. Однією з найважливіших передумов їх ефективної роботи є підвищення енергоефективності та екологічної безпеки судових енергетичних установок, зокрема парових котлів, що забезпечують подачу пари до головних і допоміжних механізмів. Оптимальне управління процесом горіння палива в судових котлах має вирішальне значення для зниження експлуатаційних витрат та зменшення шкідливих викидів у навколишнє середовище. Традиційні системи автоматичного регулювання не завжди здатні забезпечити стабільність горіння при зміні навантаження, якості палива чи зовнішніх умов, що призводить до перевитрати палива, зниження ККД котлів і підвищення рівня викидів CO_2 , NO_x та сажі [1].

У зв'язку з цим особливої актуальності набуває впровадження інтелектуальних систем контролю та оптимізації режимів горіння палива, побудованих на методах штучного інтелекту, нейронних мереж, нечіткої логіки та машинного навчання [2]. Такі системи здатні в реальному часі аналізувати параметри процесу горіння, прогнозувати зміни режимів і приймати оптимальні рішення для підтримання максимальної ефективності котельної установки [3].

В умовах переходу до автономного судноплавства такі технології мають особливе значення, адже дозволяють забезпечити стабільну, безпечну й економічну роботу енергетичних систем без постійного контролю оператора. Це сприяє не лише підвищенню рівня автономності судна, а й зменшенню витрат палива, подовженню ресурсу обладнання та зниженню екологічного навантаження на морське середовище.

Таким чином, дослідження, спрямовані на розробку та впровадження інтелектуальних систем управління оптимальним горінням палива в судових парових котлах, є актуальним і важливим напрямом розвитку автономних та

традиційних суден, що поєднує завдання енергоефективності, екологічної відповідальності та технологічної інноваційності морського флоту.

РОЗДІЛ 1 ОГЛЯД НАУКОВОЇ ЛІТЕРАТУРИ З ТЕМАТИКИ ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1. Аналіз наукових публікацій у галузі систем контролю процесів горіння палива у парових котлах

У розділі узагальнено сучасні напрями досліджень у сфері автоматизованих систем контролю процесів горіння палива в парових котлах. Розглянуто ключові методи — модельно-прогнозне керування (MPC), інтелектуальні алгоритми (штучні нейронні мережі, рішення на основі випадкових лісів, підкріплювальне навчання), нечіткі та експертні системи, а також методи візуального моніторингу факела. Наведено практичні переваги, обмеження і напрями подальших досліджень.

Контроль процесів горіння у парових котлах спрямований на підвищення паливної ефективності, зниження емісій шкідливих речовин (NO_x , CO), та забезпечення надійності й безпеки роботи. Сучасні дослідження зосереджені на впровадженні адаптивних і оптимізуючих стратегій управління, здатних враховувати нелінійність, відкладеність та мультивхідні мультивихідні зв'язки процесу [1-4].

Основні напрями досліджень [5-8]:

- Модельно-прогнозне керування (MPC). MPC показало високу ефективність у задачах контролю великих котлів завдяки вмінню працювати з обмеженнями та мультивимірними моделями. Останні роботи пропонують поєднання MPC із нейромережевими моделями (наприклад, NARX) для покращення точності моделювання нелінійних явищ та підвищення швидкодії й стійкості контролю. Практичні дослідження вказують на зниження відхилень по параметрам горіння і економію палива при впровадженні MPC у порівнянні з класичними ПІД-регуляторами.

- *Штучний інтелект і машинне навчання*

Інтелектуальні методи (штучні нейронні мережі, випадкові ліси, CART, гібридні моделі) застосовуються для побудови предиктивних моделей, класифікації станів горіння та оптимізації режимів у реальному часі. Деякі роботи демонструють архітектури, що поєднують RF (random forest) та CART для оперативного вибору оптимальних режимів, а також дослідження з підкріплювальним навчанням для безперервної оптимізації керування. Цей напрям дозволяє використовувати історичні дані для адаптації контролера до змін прояву палива, зносу обладнання та зовнішніх умов [6].

- *Нечіткі та експертні системи*

Нечіткі системи та експертні САУ корисні при непевності в даних та при неможливості точного математичного опису процесу. Вони часто застосовуються для малих і середніх котлів, а також як шар над класичними регуляторами для адаптації коефіцієнтів. Публікації останніх років описують успішні реалізації нечіткої адаптації та правило-орієнтовані експертні блоки для зниження емісій та покращення якості горіння [8-10].

- *Візуальний моніторинг факела й обробка зображень*

Методи машинного зору (аналіз зображень факела, комп'ютерний зір) використовуються для оцінки характеристик полум'я та виявлення аномалій у режимі реального часу. Це дозволяє швидко реагувати на погіршення якості горіння і корегувати співвідношення повітря-паливо, що значно знижує викиди шкідливих речовин, особливо на суднових і промислових мазутних пальниках.

Відомо, що поліпшення сенсорики — більш точні O₂-аналізатори, датчики температури, тиску та витратоміри — створюють основу для складних алгоритмів управління. Сучасні підходи також використовують непрямі методи оцінки складу повітря (наприклад, по кольору факела) як додаткові індикатори якості горіння. Польові випробування й симуляції показали, що інтеграція MPC та AI-підходів дає покращення у співвідношенні ефективність/емісія, зниження

витрат палива та кращу стабільність при змінному навантаженні. Водночас ключовими обмеженнями залишаються: необхідність якісної вимірної бази, складність побудови та валідації контрольних моделей, обчислювальні вимоги і питання кібербезпеки при віддаленому моніторингу [11-15].

Перспективні напрями досліджень

Перспективи включають гібридні контролери (MPC + AI), використання підкріплювального навчання для безперервної оптимізації, підвищення ролі візуального моніторингу та розширення використання нечітких систем для малих котлів. Також важливий розвиток у бік інтеграції з енергетичними системами та керуванням викидами згідно з нормами екологічної безпеки.

На увагу заслуговують дослідження проф. Михайленко В.С. та співавторів [9-12]: їх публікації присвячені застосуванню нейронних мереж та моделей для моніторингу та управління процесами горіння палива та викидів у суднових парових котлах. Наприклад, у роботі 2020 р. розрахована нейромережева система моніторингу викидів; у роботі 2021 р. – покращено систему управління горінням палива. Ці дослідження доповнюють загальний тренд застосування ІІ і моделювання в системах контролю процесів горіння, і відбивають практичну спрямованість (суднові котли) — що може бути цікавим як приклад галузевого застосування.

1.2 Опис конструктивних характеристик судна и обладнання агрегатів СЕУ

У дипломній роботі розглядається електрообладнання та системи керування контейнеровозу водотонажністю 50714.



Рисунок 1.1 - Контейнеровіз Maersk Copenhagen

Таблиця 1.1 - Загальна характеристика судна

Довжина,м	249,12
Ширина,м	37,4
Водотонажність ,т	50714
Дедвейт, т	69210
Швидкість,вуз	15

Таблиця 1.2. - Головний двигун

Виробник	HYUNDAI - MAN B&W
Тип	6S80 ME-C9
Потужність,кВт	23000
Число обертів, об/хв	73.9

Таблиця 1.3. - Параметри СДГ (СЕС)

Генератор	
Виробник	HYUNDAI
Тип	HFJ7
кількість	3
Потужність	2x2250kW 1x1650kW
Частота	60 Гц
Напруга	450 В

Таблиця 1.4. Аварійний ДГ

Виробник	STAMFORD
Тип	UCM274H1

кількість	1
Потужність	150 Квт
Число обертів	1800 об/хв.
Напруга	450 В

Таблиця 1.5.Допоміжний котел

Виробник	Mitsubishi
Кількість	1
Тип	МАС
Робочий тиск	1,6 МПа
Паровиробництво	60000 т/год

Клас автоматизації судна – А1

Висновки по розділу

На основі аналізу наукових публікацій можна зробити висновок, що перспективи включають гібридні контролери, використання підкріплювального навчання для безперервної оптимізації, підвищення ролі візуального моніторингу та розширення використання нечітких систем для малих котлів. Також важливий розвиток у бік інтеграції з енергетичними системами та керуванням викидами згідно з нормами екологічної безпеки.

Дослідження у сфері систем контролю процесів горіння палива в парових котлах демонструють перехід від класичних регуляторів до інтелектуальних, адаптивних і візуально орієнтованих методів. Застосування модельно-прогнозного керування (MPC), нейромережевих алгоритмів і нечітких систем дозволяє підвищити ефективність спалювання, знизити витрати палива та мінімізувати викиди.

РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛИ ОБ'ЄКТУ УПРАВЛІННЯ

2.1. Огляд сучасних методів контролю та управління процесами горіння рідкого палива у промислових та суднових парових котлів

Суднові парові казани (СПК) є складними об'єктами автоматичного регулювання з великою кількістю регульованих параметрів та регулюючих впливів. Котли мають значну акумулюючу здатність теплової енергії у воді, парі та металі пароводяного тракту. Нарешті котельні агрегати характеризуються значними швидкостями протікання процесів у пароводяному тракті. Так, зниження рівня води в барабані котла на 100 мм при повній паропродуктивності котельного агрегату із припиненням подачі живильної води відбувається за 20 с.

Показниками перебігу теплових процесів на СПК є регульовані параметри. Серед них зовнішні: витрата пари, тиск пари при виході з котла, температура перегріву пари і внутрішні: рівень води в барабані котельного агрегату, коефіцієнт надлишку повітря, розрідження в топці тощо [4].

Характер перебігу фізичних процесів у СПК визначається видом і величиною впливів: зовнішніх - з боку споживача (агрегатів СЕУ), внутрішніх - зміна складу та якості палива, надлишку повітря, що подається в топку котла, розрідження в топці, зміна витрати поживної води.

СПК представляє складну динамічну систему з кількома взаємопов'язаними вхідними та вихідними величинами. Однак виражена спрямованість ділянок регулювання основними каналами регулюючих впливів дозволяє здійснювати стабілізацію та зміну регульованих параметрів за допомогою незалежних одноконтурних систем, пов'язаних через об'єкт регулювання - котельний агрегат.

Автоматична система регулювання (АСР) барабанного суднового парового котла загалом складається з окремих замкнутих контурів (рис.2.1):

- тиску перегрітої пари та теплового навантаження;
- Економічність процесу горіння палива;
- Розрідження у верхній частині топки;
- температури перегрітої пари;
- живлення котловою водою;
- якості води.

Вимоги високої точності регулювання параметрів для забезпечення надійної та економічної роботи котельного агрегату зумовлює необхідність застосування швидкодіючих автоматичних регулювальних пристроїв. У регулюванні котлоагрегатів широко використовуються електричні схеми з електронними регуляторами. Як виконавчі механізми використовуються електромеханічні сервоприводи з редукторами та системи дистанційного керування.

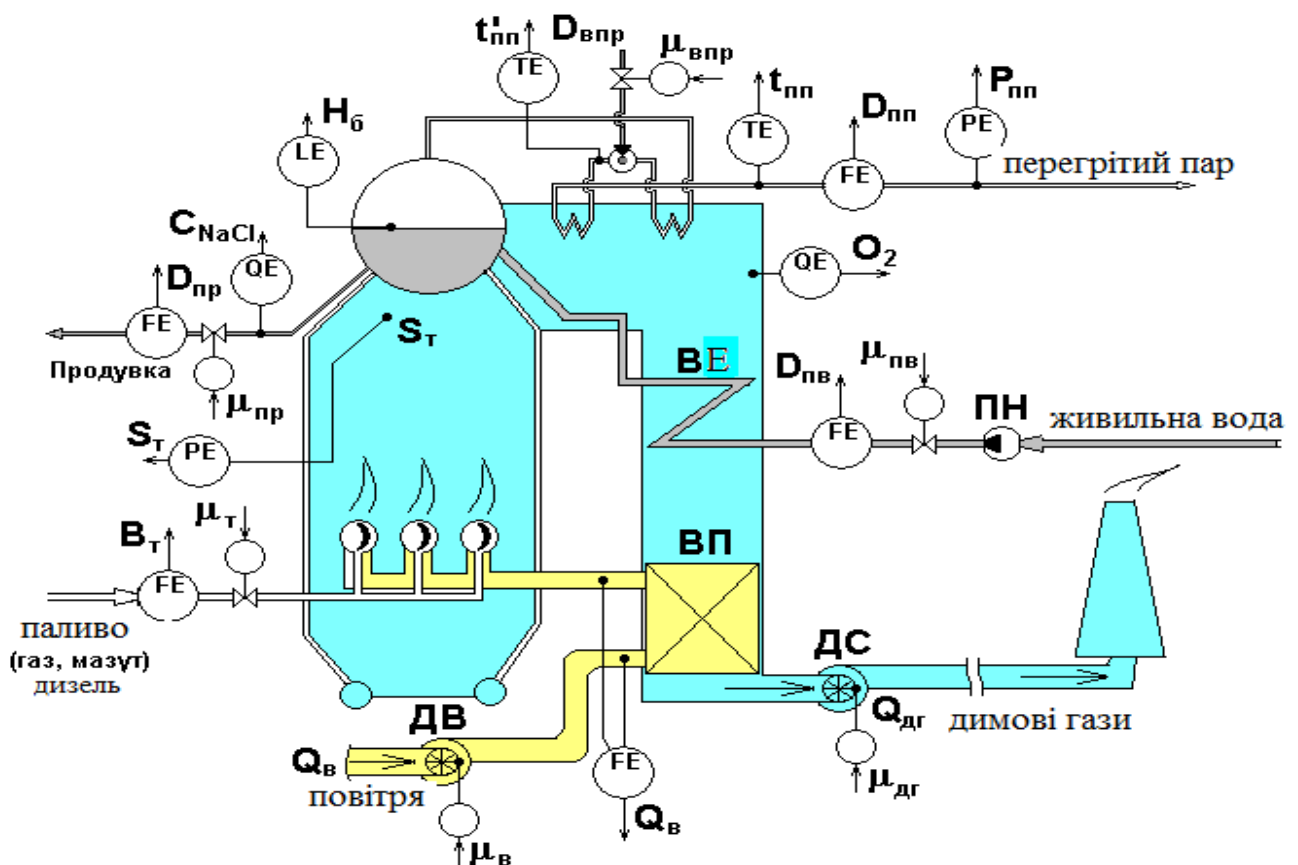


Рисунок 2.1 - Функціональна схема допоміжного водотрубного СПК з примусовою циркуляцією марки Mitsubishi MB з паровою продуктивністю 12

т/г і працюючого на СПТУ: TE – датчик температури; PE – датчик тиску; QE – аналізатор; LE – датчик рівня; FE – датчик витрати; ДС – димосос; ВП – повітрепідігрівач; ВЕ – водяний економайзер; ДВ – вдувний вентилятор; ПН – живильна вода; μ_i – управляючі дії; $D_{пп}$ – витрата перегрітого пару; $D_{пв}$ – витрата живильної води; $D_{пр}$ – витрата води на продувку; B_t – витрата палива; H_6 – рівень води в барабані; Q_i – кількість тепла; $P_{пп}$ – тиск пару; S_t – розрядження; O_2 – вміст кисню; C_{NaCl} – вміст солі

Регулювання економічності процесу горіння. Економічність роботи котла оцінюють по ККД, рівному відношенню корисної теплоти, витраченої на генерування і перегрів пари, до теплоти, що розташовується, яка могла бути отримана при спалюванні всього палива.

Без урахування теплоти, що вноситься в топку повітрям, і втрат на продувку ККД котла визначається формулою [5]:

$$\eta_K = G_{пп}(h_0 - h_{пв}) / B_t Q_H^P, \quad (2.1)$$

де h_0 , $h_{пв}$ – ентальпії перегрітої пари та поживної води; $Q_{рн}$ – нижча робоча теплота згоряння палива, B_t – витрата палива.

Тоді ККД СПК визначається з зворотного рівняння теплового балансу по формулі [6]:

$$\eta_K = 100 - (q_2 + q_3 + q_4 + q_5), \quad (2.2)$$

де q_2 – втрата тепла з вихідними газами; q_3 – теплові втрати від хімічного недопалу; q_4 – теплові втрати від механічної неповноти згорання палива; q_5 – втрати тепла через обмундировку.

В свою чергу q_2 визначають по формулі [6]:

$$q_2 = \frac{I_{yx2} - \alpha V_B^O C_B t_B}{Q_c^n} \cdot (100 - q_4), \quad (2.3)$$

де I_{yx2} - ентальпія вихідних газів; V_B^O - теоретичний об'єм повітря; C_B - теплоємність повітря; t_B - температура повітря; Q_c^n - теплота згорання палива.

Для СПК, працюючих на мазуті, втрата q_4 можлива при неправильному обслуговуванні, роботі з надмірним надлишком або недоліком повітря і низьку якість розпилення мазуту. У цих випадках втрата q_4 з'являється внаслідок сажоутворення і коксування мазуту. У нормальних умовах експлуатації котлів з мазутним опаленням втрата теплоти q_4 практично відсутня при всіх його навантаженнях ($q_4 = 0$) [4]. Теплові втрати q_3 і q_4 пов'язані з досконалістю процесу спалювання палива, тому їх відносять до топкових втрат. Втрата теплоти в навколишнє середовище через зовнішні поверхні q_5 визначається в основному розмірами котла, якістю ізоляції, компонуванням повітряних каналів і обшивки. При достатньої теплоізоляції і гарному її стані втрата q_5 залежить від режиму роботи. У разі нормального навантаження сучасного ДПК, в якому передбачено охолодження стін повітрям, що поступає в топку, зазвичай $q_5 = 0,1 - 0,5\%$. [137]. У формулі (2.2) для аналізу представляють інтерес втрати q_2 і q_3 , так як α не впливає на q_5 . Згідно [6], встановлено, що при оптимальному значенні α , ККД СПУ буде рости, внаслідок зменшення втрат q_2 , і відсутності втрат q_3 .

Одним з найбільш представницьких непрямих способів оцінки економічності процесу горіння є аналіз складу топкових газів, що залишають топку. На основі залежності ККД і сумарних втрат від надлишку повітря, що визначається індивідуально для кожного агрегату, доцільно підтримувати коефіцієнт надлишку повітря, при якому ККД котла $\eta_k \rightarrow \eta_{\max}$ и суммарные потери

$$\sum_{i=2}^6 q_i \text{ прагнуть до мінімуму.}$$

Значення коефіцієнта надлишку повітря можна оцінити за вмістом вільного кислорода в газах, що залишають камеру топки, за наближеною формулою [7]:

$$\alpha = 21/(21 - O_2).$$

Значення в основному впливає на q_2 (втрати теплоти з газами), q_3 і q_4 (втрати теплоти від хімічного і механічного недопалів палива). Залежно представлені на рис. 2.2.

$$\sum_{i=2}^6 q_i = f(\alpha) \text{ та } \eta_K = f(\alpha)$$

Ділянка регулювання економічності процесу горіння за вмістом кисню в топкових газах складається з топкової камери і газоходу, що примикає до неї, конвективного перегрівача до місця вимірювання вмісту $O_2, \%$. Вхідний регулюючий вплив - витрата повітря, що надходить у топку Q_B ; вихідна (регульована) величина - вміст вільного кисню в поворотній камері газоходу за пароперегрівачем $O_2\%$ (див. рис. 2.2).

Оптимальне значення O_2 у поворотній камері при номінальному навантаженні та при спалюванні мазуту та газу від 0,05 до 2 %.

Оптимальний надлишок повітря в загальному випадку визначають не тільки економічністю, а й низкою інших факторів, таких як інтенсивність корозії поверхонь нагріву, утворення шкідливих сполук (окисів сірки та азоту) та ін.

Інерційність ділянки залежить від об'єму камери топки і газоходу, що примикає до неї, а також від запізнення у вимірювальному пристрої. При математичному описі динамічних властивостей цю ділянку представляють у вигляді послідовного з'єднання двох ланок: транспортного запізнювання та першого інерційного порядку з постійної часу T [7].

Способи та схеми регулювання

Основним способом регулювання надлишку повітря за пароперегрівачем служить зміна його кількості подається в топку за допомогою дутьових вентиляторів. Існує кілька варіантів схем [7] автоматичного управління подачею повітря в залежності від способів непрямой оцінки економічності процесу горіння за співвідношенням різних сигналів. Проведемо аналіз кожною їх із метою визначення оптимальної за критерієм витрати палива.

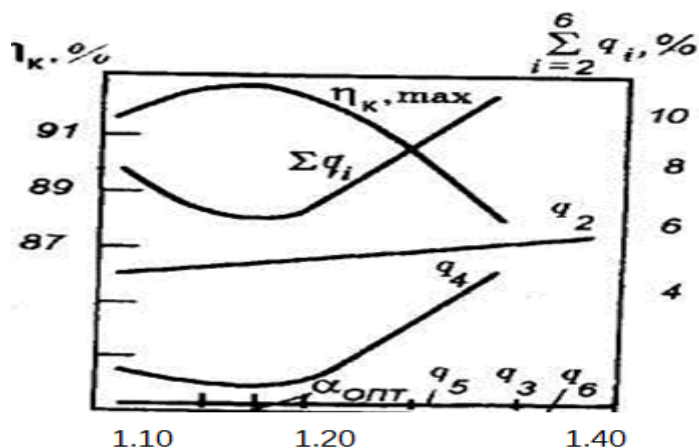


Рисунок 2.2 - Графічні залежності зміни ККД СПК від коефіцієнта надлишку повітря [5]

1. Регулювання економічності щодо співвідношення паливо - повітря.

При постійній якості палива його витрата та кількість повітря, необхідне для забезпечення необхідної повноти згоряння, пов'язані прямою пропорційною залежністю, яка встановлюється в результаті режимних випробувань. Якщо вимір витрати палива виконують досить точно, то підтримку оптимального надлишку повітря можна реалізувати, використовуючи схему регулювання, відому під назвою паливо - повітря (рисунок 2.3, а). При газоподібному паливі необхідне співвідношення між кількостями газу і повітря здійснюється просто: порівнюють перепади тисків на пристроях, що звужують, що встановлюються на газопроводі і на повітропідігрівачі або ж на спеціальному вимірювальному пристрої витрати повітря. Різниця цих сигналів подається на вхід автоматичного регулятора економічності, що управляє подачею дутьових вентиляторів.

На нашу думку спосіб регулювання не враховує якісної зміни складу та витрати палива, пов'язаного зі збільшенням або зменшенням швидкості повітря, або з порушенням нормальної роботи насосів палива.

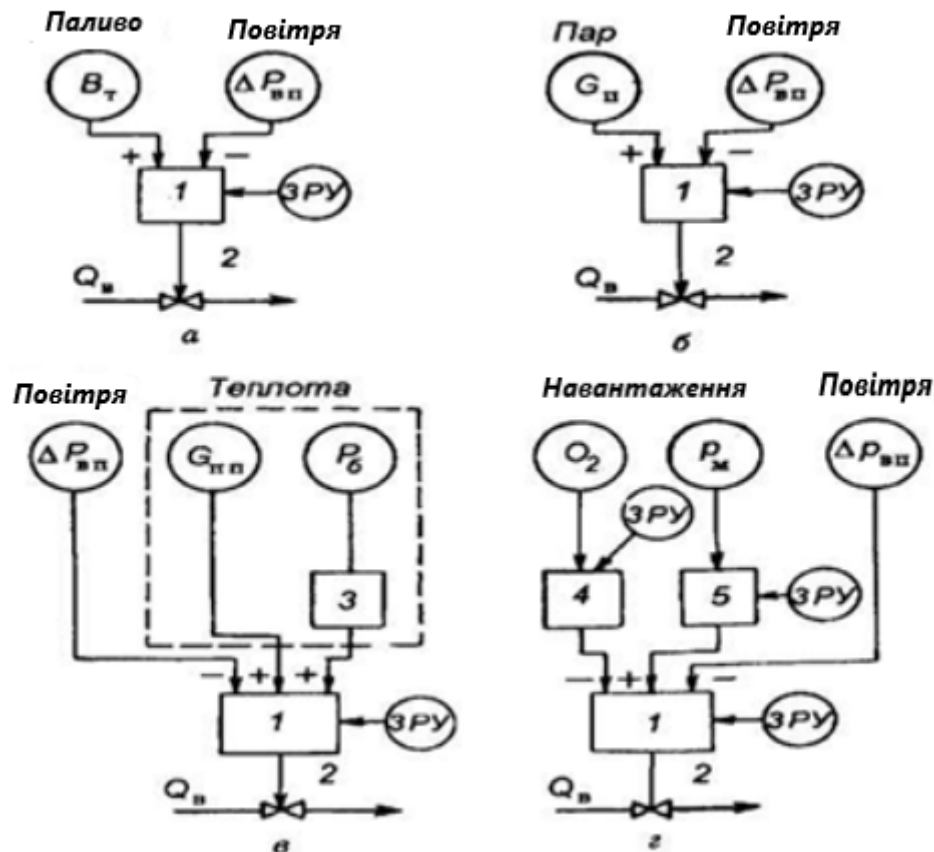


Рисунок 2.3 - Регулювання подачі повітря за співвідношенням [8]:

а - паливо - повітря; б - пара - повітря; в – тепло – повітря; г - навантаження - повітря з корекцією по O_2 ; 1 - регулятор подачі повітря; 2 - регулюючий орган; 3 - диференціатор; 4 - коригуючий регулятор повітря; 5 — регулятор регулювання тиску перегрітої пари, що коригує (регулятор завдання по навантаженню)

2. Регулювання економічності за співвідношенням пар – повітря

На одиницю витрати різного складу палива необхідно різну кількість повітря. На одиницю теплоти, що виділяється при згорянні різних видів палив, потрібно одне і теж його кількість. Тому, якщо оцінювати тепловиділення в топці за витратою пари і змінювати подачу повітря відповідно до змін цієї витрати, то в принципі можна досягти оптимального надлишку повітря. Цей принцип регулювання подачі повітря використовують у схемі пар — повітря (рисунок 2.3, б).

3. Регулювання економічності за співвідношенням сигналів (рисунок 2.3, в). Якщо тепловиділення у топці Q_T оцінювати за витратою перегрітої пари та швидкості зміни тиску пари в барабані, то інерційність цього сумарного сигналу при топкових збуреннях буде істотно менше інерційності одного сигналу з витрати пари $Q_{пп}$. Відповідне заданому тепловиділення кількість повітря вимірюють по перепаду тисків на повітропідігрівачі або придушення повітря в напірному патрубку вентилятора. Різниця цих сигналів використовують як вхідний сигнал регулятора економічності.

4. Регулювання економічності за співвідношенням завдання повітря з додатковим сигналом за вмістом O_2 у димових гази (рисунок 2.3, г). Зміст O_2 у продуктах згоряння палива характеризує надлишок повітря та слабо залежить від складу палива. Отже використання O_2 як вхідний сигнал автоматичного регулятора, що впливає на витрату повітря, цілком доцільно. Однак реалізація цього способу утруднена через відсутність надійних і швидкодіючих газоаналізаторів кисню. Тому в промислових умовах набули поширення схеми регулювання подачі повітря не з прямим, а з коригуючим впливом по O_2 .

Підтримка надлишку повітря за співвідношенням сигналів теплота - повітря і особливо пар - повітря відрізняється простотою і надійністю, але не є точним. Цього недоліку позбавлена, наприклад, система регулювання економічності, що діє за схемою завдання - повітря з додатковою корекцією по O_2 . У системі загалом поєднують принципи регулювання з обурення та відхилення. Регулятор подачі повітря 1 змінює його витрату по сигналу від головного або коригувального регулятора тиску 5, що є автоматичним задатчиком регулятора навантаження котла. Сигнал, пропорційний витраті повітря РВП, діє як і в інших схемах: по-перше, усуває збурення з витрат повітря, не пов'язані з регулюванням економічності (включення або відключення систем пилоприготування тощо); по-друге, сприяє стабілізації самого процесу регулювання подачі повітря, оскільки служить одночасно сигналом жорсткого негативного зворотного зв'язку.

Таким чином, на нашу думку, порівняльний аналіз дозволяє зробити висновок, що введення додаткового сигналу, що коригує, за вмістом O_2 підвищує точність

підтримки оптимального надлишку повітря в будь-якій системі регулювання економічності. Додатковий коригуючий регулятор 4 по O_2 у схемі регулювання завдання - повітря керує подачею повітря при топкових збуреннях і безпосередньо забезпечує підтримку заданого надлишку повітря в топці і є найпотужнішим технічним рішенням.

2.2 Дослідження процесів горіння рідкого палива в суднових парових котла

Як типовий об'єкт дослідження за критеріями паропродуктивності і конструкції, обраний судновий допоміжний двохлабанний парогенератор середньої потужності фірми Mitsubishi типу MAC - 16, продуктивністю 16 тон пару на годину, робочим тиском пару 1.5 МПа (16 кгс / $см^2$), температурою пару 283 °C і ККД 83,4 % (рис. 2.4). Даним типом котлів обладнані багато суден контейнерного флоту

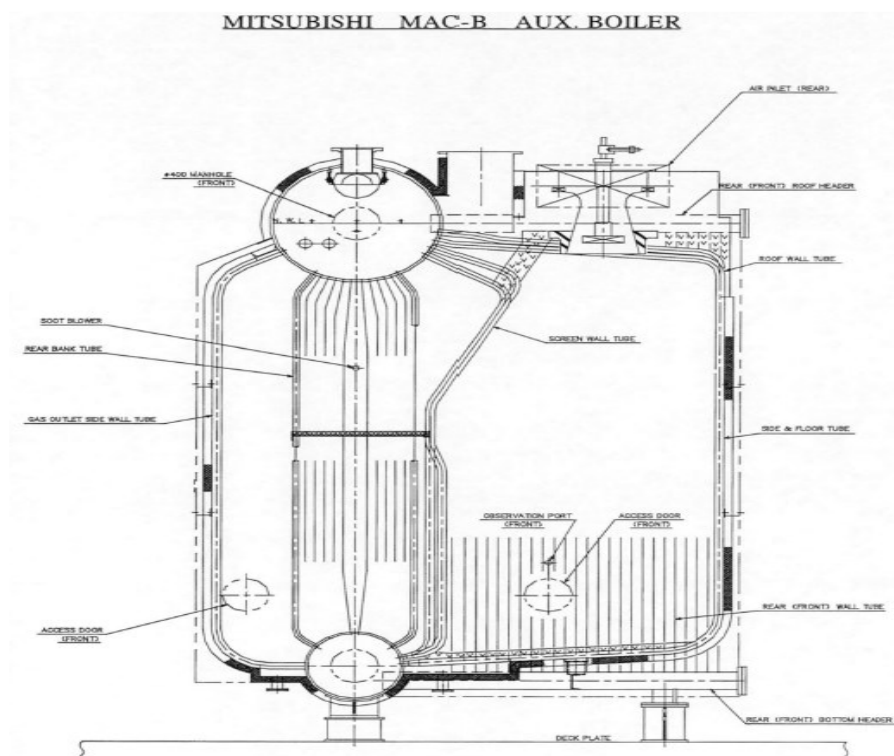


Рисунок 2.4 - Конструктивний вигляд допоміжної СПк Mitsubishi типу MAC

Функції приведення навантаження котла до заданого значення, функції забезпечення відповідності між подачами палива та повітря, стабілізації розрідження в топці покладаються на регулятори палива, повітря та тяги, комплекс яких називається «регуляторами процесу горіння».

СПК як об'єкт управління представляє собою складну динамічну систему з взаємозв'язаними вхідними і вихідними величинами, запропонована схема взаємозв'язків представлена на рис. 2.5. Виражена спрямованість ділянок регулювання по основним каналам регулюючих впливів, таким як витрата живильної води $D_{\text{ПВ}}$ – рівень $H_{\text{Б}}$; витрата води на вприскування $D_{\text{ВПр}}$ – температура перегріву пару $T_{\text{пп}}$; витрата палива $B_{\text{т}}$ – тиск пару $P_{\text{пп}}$ і ін. дозволяє здійснити стабілізацію регульованих величин за допомогою незалежних одноконтурних систем, пов'язаних лише через загальний об'єкт управління (СПУ). При цьому регулюючий вплив тієї чи іншої ділянки (суцільні лінії на рис. 2.3) служить основним способом стабілізації регульованої величини, а інші впливи вважаються по відношенню до цієї ділянки внутрішніми або зовнішніми збуреннями.

Статичний режим роботи СПК представлений рівнянням теплового балансу [3]:

$$Q_{0\text{пс}} + Q_{0\text{пв}} - Q_{0\text{п}} = 0,$$

де $Q_{0\text{пс}}$, $Q_{0\text{пв}}$, $Q_{0\text{п}}$ – кількість теплоти підведених в паровій тракт відповідно продуктами згоряння палива, живильною водою і відведеної з паром (кДж).

У більшості застосовуваних в даний час пристроїв спалювання палива оптимізація режиму горіння забезпечується шляхом підтримки співвідношення витрат палива і повітря (тиску перед пальникових пристроїв) відповідно до режимної карти СПК [3]. Такий спосіб є недостатньо ефективним, він не дозволяє вести облік зміни температури і вологості повітря, теплотворної здатності палива і ряду інших чинників. У зв'язку з цим, при складанні режимних карт допускають наявність значного надлишку повітря, щоб ні не допустити виникнення хімічного недожога.

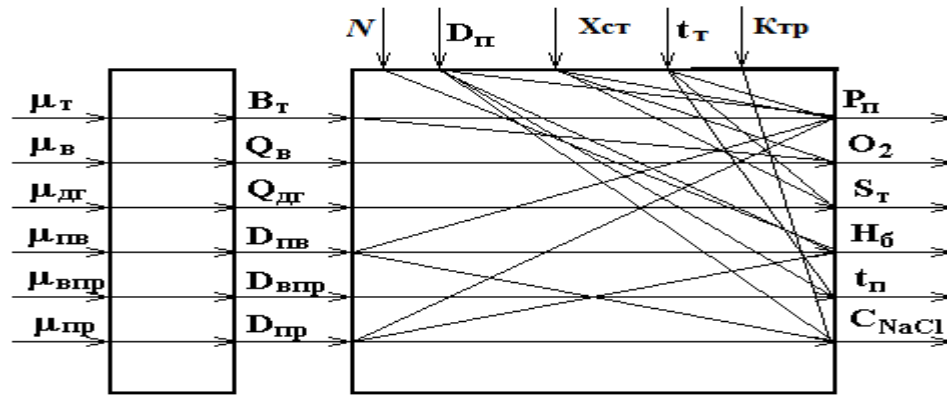


Рисунок 2.5 - Структурна схема взаємозв'язку параметрів барабанного водотрубного головного суднового парогенератору (етап структурної ідентифікації): $D_{п}$ – витрата пару; t_T – температура палива; S_T – розрідження; $P_{п}$ – тиск пару; $H_б$ – рівень в барабані; $t_{п}$ – температура пару; C_{NaCl} – вміст солі; $D_{пв}$ – витрата живильної води; Q_V – кількість тепла повітря; $D_{впр}$ – витрата води на паровий перегрівач; $D_{пр}$ – витрата води на продувку; $Q_{дг}$ – кількість тепла в димових газах; B_T – витрата палива; μ_i – управляючі дії по відповідним каналам регулювання; O_2 – вміст кисню; $K_{тр}$ – корозія в трубах; N – зовнішні випадкові збурення; $X_{ст}$ – хімічний склад палива

В результаті в деяких режимах кількість повітря перевищує оптимальне в 1,5-2 рази, що призводить до необхідності нагріву надлишкового повітря, що подається, тобто до збільшення теплових втрат з газами і як наслідок до значного зниження ККД СПК [6].

Коефіцієнт надлишку повітря α , який не можна безпосередньо виміряти, може бути визначений за вмістом кисню в димових газах практично незалежно від складу палива. Коефіцієнт надлишку повітря визначається витратою повітря M_L витратою палива B_T . Однак на практиці ΔC_{O_2} не вдається виміряти в точці, розташованій безпосередньо за зоною закінчення процесу горіння. У більшості випадків точка відбору проби знаходиться в конвективній частині котла. При цьому гази спочатку перемішуються в зоні горіння, потім транспортуються через радіаційні поверхні і потім додатково перемішуються в зоні конвективних

поверхонь нагріву. Глибоке перемішування відбувається в димососі (особливо в димососах відцентрового типу). Ця підсистема (об'єкт) СПК може бути апроксимована рівнянням [5]:

$$T_2^{23} \frac{d^2 \Delta C_{O_2}}{dt^2} + T_1^{23} \frac{d \Delta C_{O_2}}{dt} + \Delta C_{O_2} = k_2^{23} \Delta M_L(t - \tau) + k_4^{23} \Delta B_T(t - \tau), \quad (2.4)$$

де τ – час транспортного запізнення; (приймається рівним величині інерційності самого газоаналізатора, для газоаналізатора $\tau = 50$ с):

$$T_2^{23} = T_B^2; T_1^{23} = 2T_B; T_B = \frac{\bar{T}_B}{3}; k_2^{23} = \frac{21}{\bar{M}_L \bar{\alpha}}; k_4^{23} = -\frac{21}{\bar{B}_T \bar{\alpha}},$$

де $\bar{B}_T$ – номінальна витрата палива, кг/с; $\bar{\alpha}$ – коефіцієнт надлишку повітря; $\bar{T}_B$ – середній час проходження димових газів від топки до місця заміру, с.

2.3. Проведення парметричної ідентифікації контуру системи управління СПК

У даному розділі розглядається процес побудови математичних моделей САУ СПК з використанням експериментальних даних, що дає можливість отримати адекватні моделі для подальшого синтезу та оптимізації САУ горіння палива. Математичне моделювання полягає у побудові рівнянь, що описують поведінку системи, на основі експериментальних даних чи теоретичних знань про об'єкт.

Основна мета моделювання – отримати модель, яка найбільш точно відображає характеристики реальної системи в умовах різних впливів. В системах керування судновими технічними засобами використовують різні види моделей, серед яких виділяють лінійні та нелінійні моделі, динамічні та статичні, детерміновані та стохастичні [8]. Експериментальні дані були отримані за допомогою суднової системи моніторингу параметрів СПК на судні (рис. 2.6)

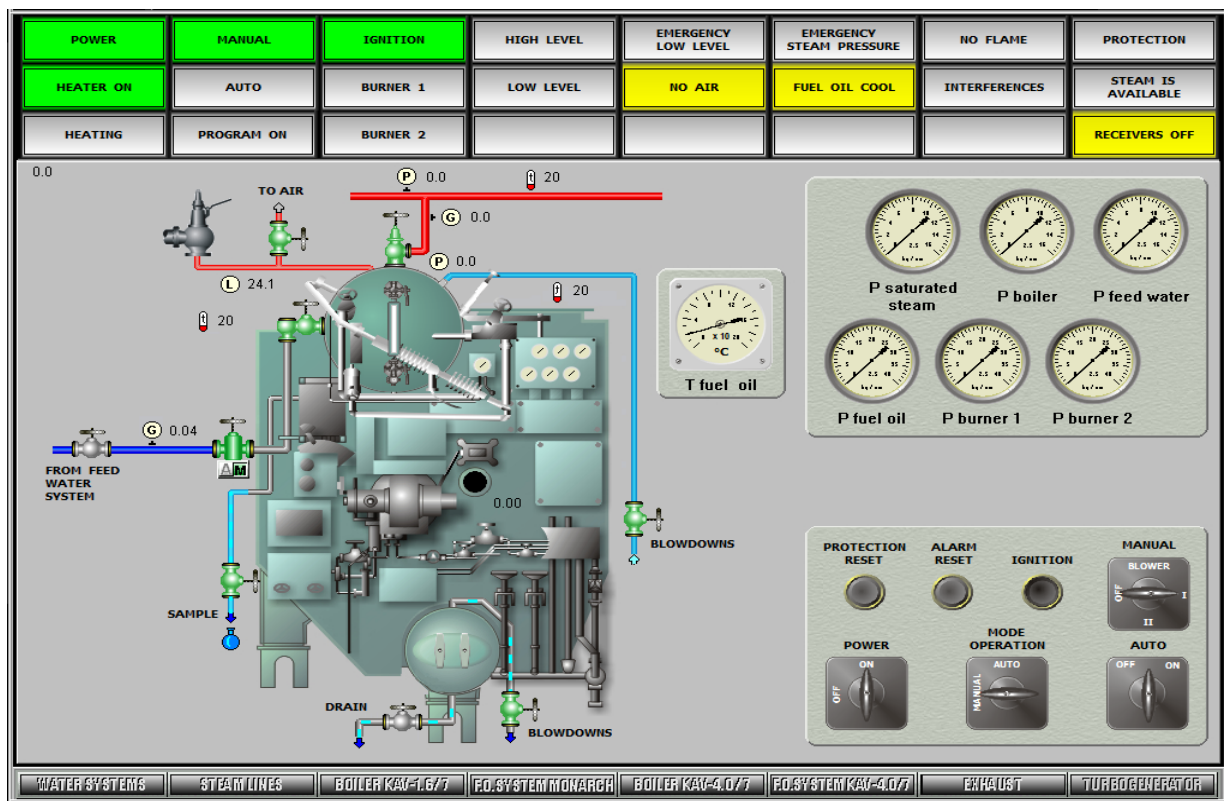


Рисунок 2.6 - Мнемосхема параметрів СПК на моніторі CCM

Процес математичного моделювання можна поділити на декілька етапів [Мих Гвоздева методичка Мет синтеза] :

1. Формулювання задачі моделювання

– Визначення мети моделювання, вхідних та вихідних параметрів, основних обмежень і характеристик системи управління.

2. Розробка структурної (функціональної) схеми системи

– Візуальне подання елементів системи управління та їх взаємодій, наприклад у вигляді блок-схеми або графа.

3. Створення математичної моделі

– Перетворення вербальної та структурної моделей у систему математичних рівнянь (диференціальних, алгебраїчних, логічних тощо).

4. Аналіз і спрощення моделі (за потребою)

– Визначення припущень, спрощення складних взаємозв'язків для полегшення розрахунків або симуляції.

5. Вибір методу розв'язання моделі

– Аналітичні або чисельні методи, вибір алгоритмів для розв'язання системи рівнянь.

6. Моделювання (обчислювальний експеримент)

– Проведення розрахунків, імітація поведінки системи в різних умовах.

7. Аналіз результатів моделювання

– Інтерпретація отриманих даних, порівняння з реальними процесами або експериментами.

8. Перевірка та верифікація моделі

– Оцінка адекватності моделі: наскільки вона точно відображає реальну систему.

9. Коригування моделі

– Внесення змін у модель на основі результатів аналізу, для підвищення її точності або стійкості.

10. Документування та впровадження результатів

– Оформлення результатів моделювання, підготовка рекомендацій для практичного використання.

Експериментальна крива розгону, що показує зміну вмісту кисню в димових газах при збільшенні парового навантаження СПК на 25% показано на рис. 2.7.

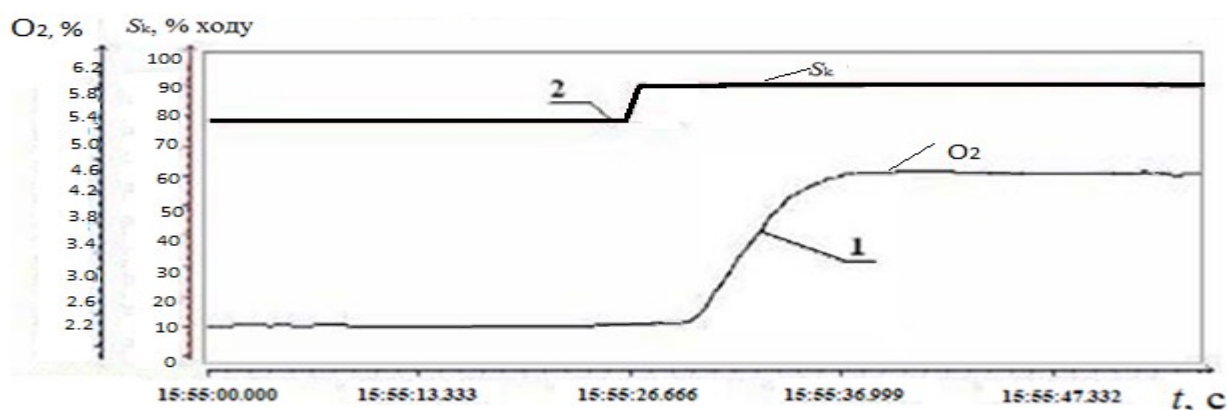


Рисунок 2.7. - Розгона крива та положення клапану подачі повітря у графічному тренді панелі ССМ СПК марки МАС - 16

1 – зміна вмісту O_2 у димових газах; 2 – % ходу відкриття клапану повітря

При відкритті клапану на 10 % зміниться зміст кисню з 2.2 до 4.6 %. Час спостереження 20 секунд. На основі експериментальних даних активного експерименту була створена таблиця для подальшої парметричної ідентифікації (визначення значень математичної моделі каналу управління «зміна клапана подачі повітря – зміна вміст кисню в димових газах»). Процес зміни витрати повітря був пов'язаний з відповідним зміною витрати палива для підтримки ефективності процесу горіння. виробляв більше пари для агрегатів СЕУ.

Таблиця 2.1. Експериментальні дані ССМ парового котла Mitsubishi MAC - 16

O ₂ , %	2.2	2.6	3.0	3.4	3.8	4.2	4.6	4.6	4.6	4.6
ΔS, % ходу РО	1	5	6	7	8	9	10	10	10	10
t, с	1	3	4	5	6	7	8	9	10	11

Ідентифікація систем є важливою частиною процесу синтезу систем управління, особливо для складних суднових технічних об'єктів, таких як агрегати СЕУ. Одним з потужних інструментів для вирішення задачі ідентифікації систем є "System Identification Toolbox" у середовищі MATLAB, який дозволяє виконувати процес розробки моделей різних типів та складності на основі даних вимірювання отриманих від систем моніторингу.

Ідентифікація САУ — це процес розробки математичної моделі об'єкта управління на основі аналізу вхідних та вихідних даних. Він передбачає наступні етапи [5]:

1. **Збір даних:** проведення експериментів, що дозволяють отримати вхідні та вихідні сигнали від системи управління.
2. **Попередня обробка даних:** включає видалення шумів, аномалій, нормалізацію та інтерполяцію даних.
3. **Вибір структури моделі:** визначення типу моделі (лінійної або нелінійної), структурної схеми САУ та вибір параметрів для її побудови.

4. **Оцінка параметрів моделі:** використання методів оптимізації для налаштування параметрів моделі на основі зібраних даних.

5. **Валідація та верифікація моделі:** перевірка відповідності побудованої моделі реальним даним і її здатності відображати поведінку системи.

Ідентифікація систем дозволяє створювати моделі, які можуть бути використані для аналізу, прогнозування та синтезу систем управління, що є ключовим етапом при розробці сучасних суднових технічних засобів.

Етапи ідентифікації в програмній среде показаны на рис.

Код програми:

1. вводимі необхідні данні (завдання) у середовищі MatLab для подальшої їх обробки (у вигляді стовбців) (табл.2.1).
2. `>> O2 = [0;0;2.2;2.6;3.0;3.4;3.8;4.2;4.6;4.6;4.6;4.6];`
3. `>> S = [0;0;10;10;10;10;10;10;10;10;10;10];`
4. `>> t = [1;2;3;4;5;6;7;8;9;10;11;12];`
5. `>> hold all;`
6. `>> plot(t,O2);`
7. `>> hold all;`
8. `>> plot(t,O2);`
9. `>> plot(t,S);`

Після цього для побудування графіку залежності параметра S від часу відповідно до введених даних, прописуємо наступну команду: `plot (t,y);` Та отримуємо наступну криву (рис. 2.8.).

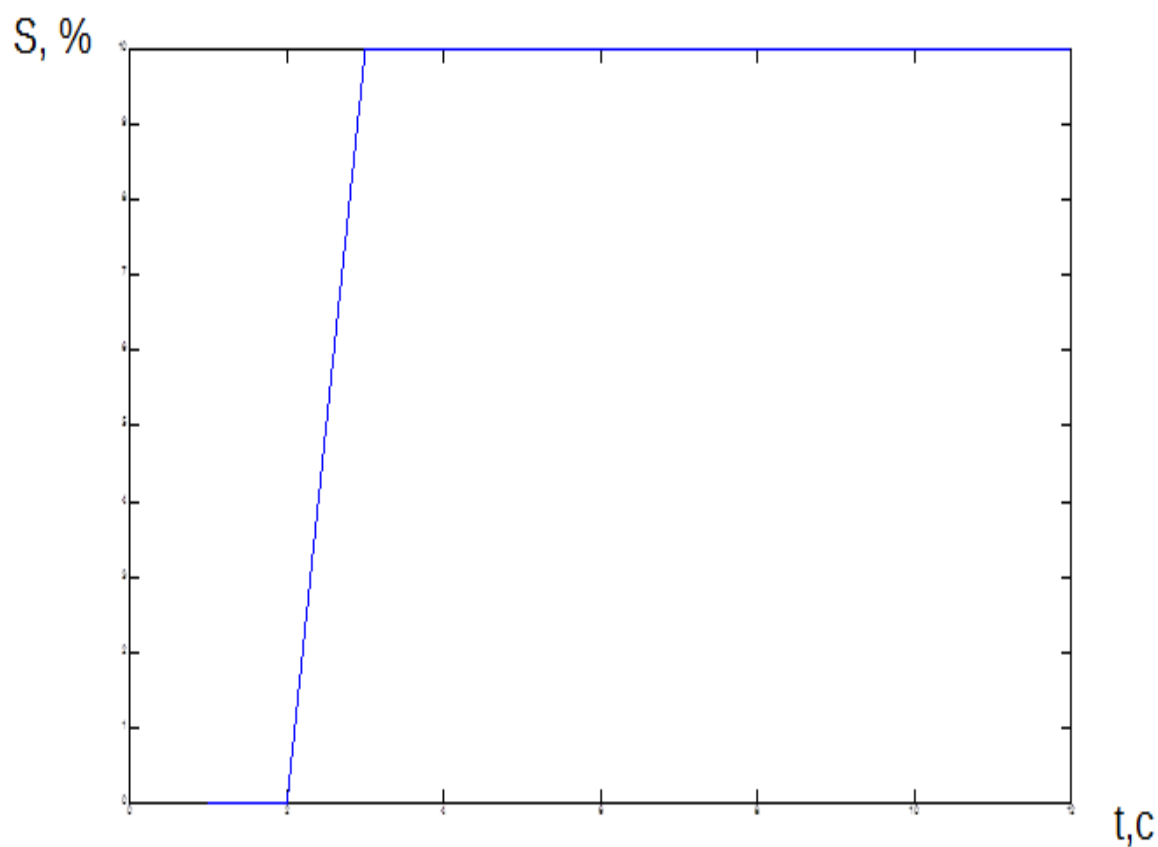


Рисунок 2.8 - Графік залежності параметра S від часу

Аналогічно робимо і для побудови графіка залежності параметра O_2 від часу, та отримуємо залежності у вигляді кривих вхідного та вихідного на графіку (рис.2.9).

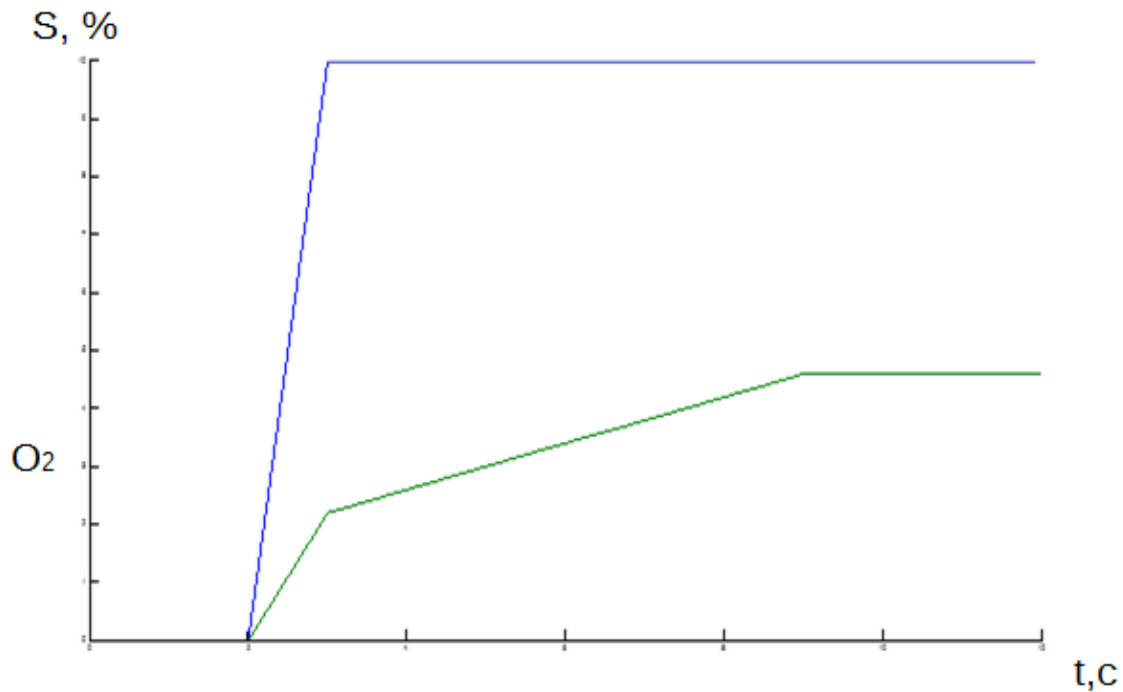


Рисунок 2.9 - Графіки залежності параметрів O_2 та S від часу

Наступним кроком є процес ідентифікації отриманих результатів, для цього у програмну строку вводимо команду: `ident`, та відкривається наступне віконце (рис. 2.10).

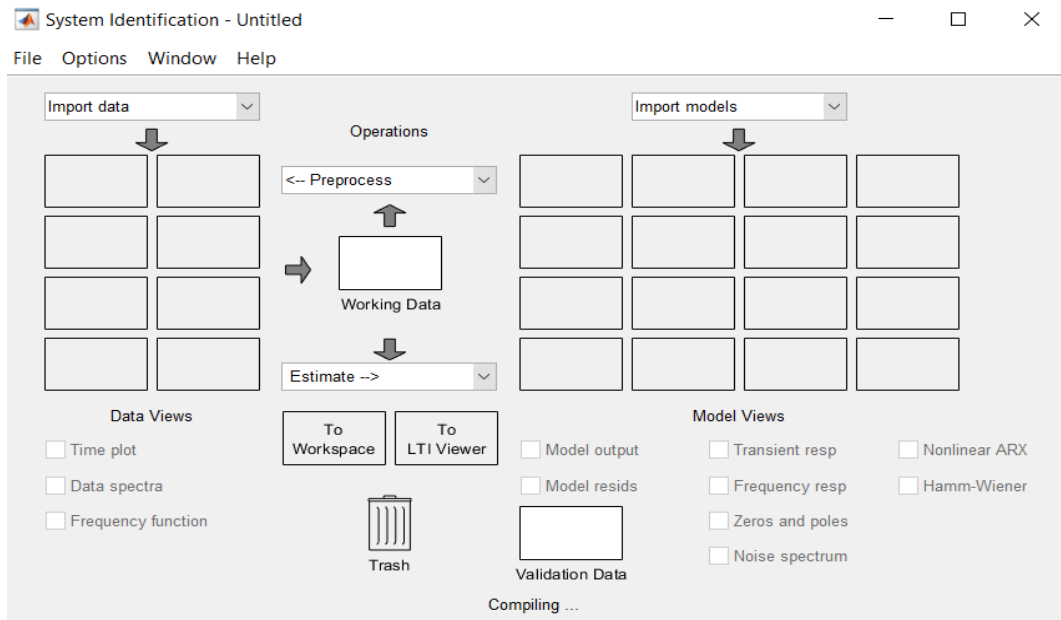


Рисунок 2.10 - Вікно робочого простору системи ідентифікації

Обираємо “Time domain data” і у новому віконці (рис.) вказуємо вихідний та вхідний сигнали, а саме: S та O_2 і змінюємо початковий час на 0 та натискаємо import (рис. 2.11).

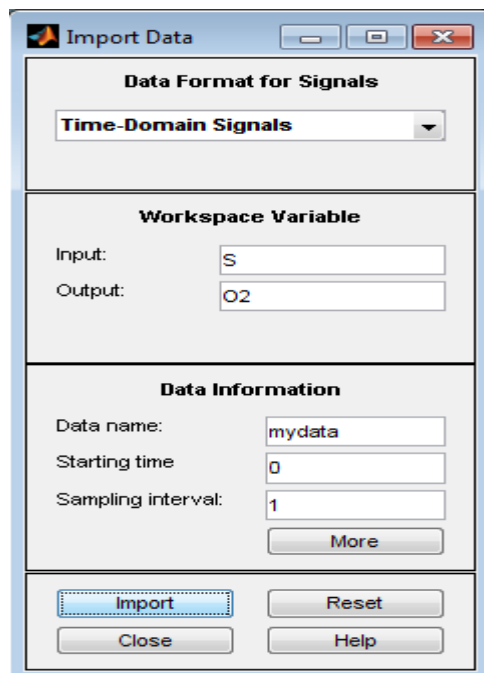


Рисунок 2.11 - Вікно робочого простору для вибору даних системи ідентифікації.

Отримуємо наступні зміни у вікні робочого простору системи ідентифікації (рис. 2.12)

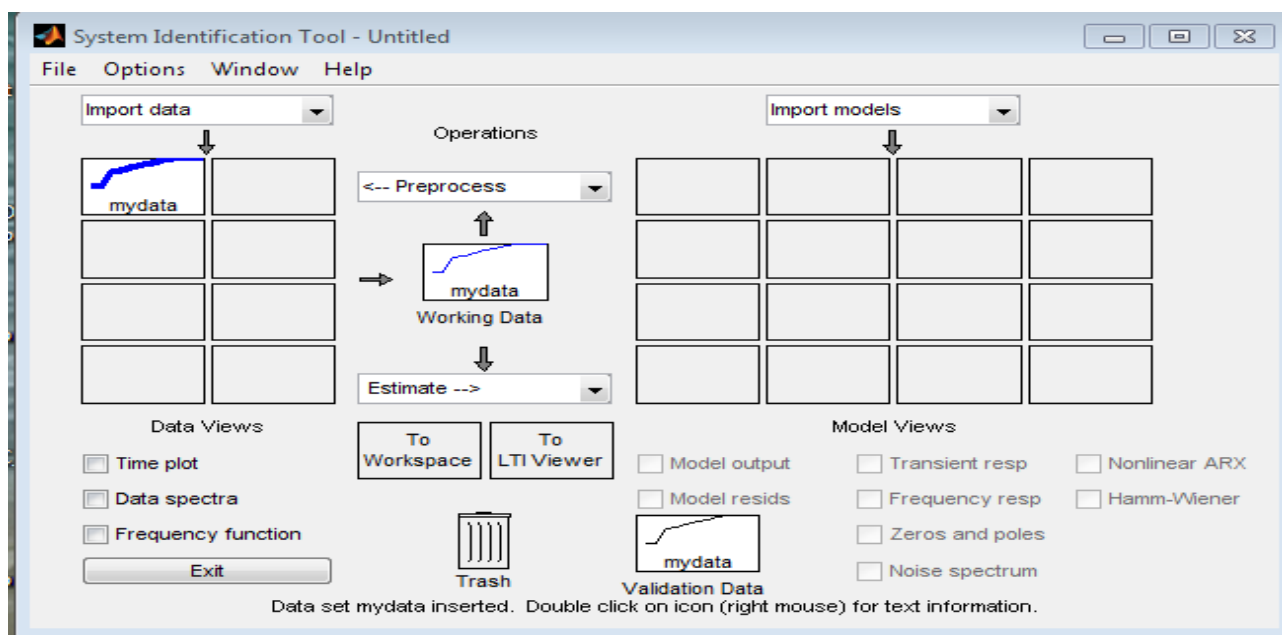


Рисунок 2.12 - Вікно робочого простору системи ідентифікації після імпорту даних

Наступний крок в програмі - обираємо замість «estimate» – «process models» та отримуємо нове віконце (рис. 2.13 – 2.14).

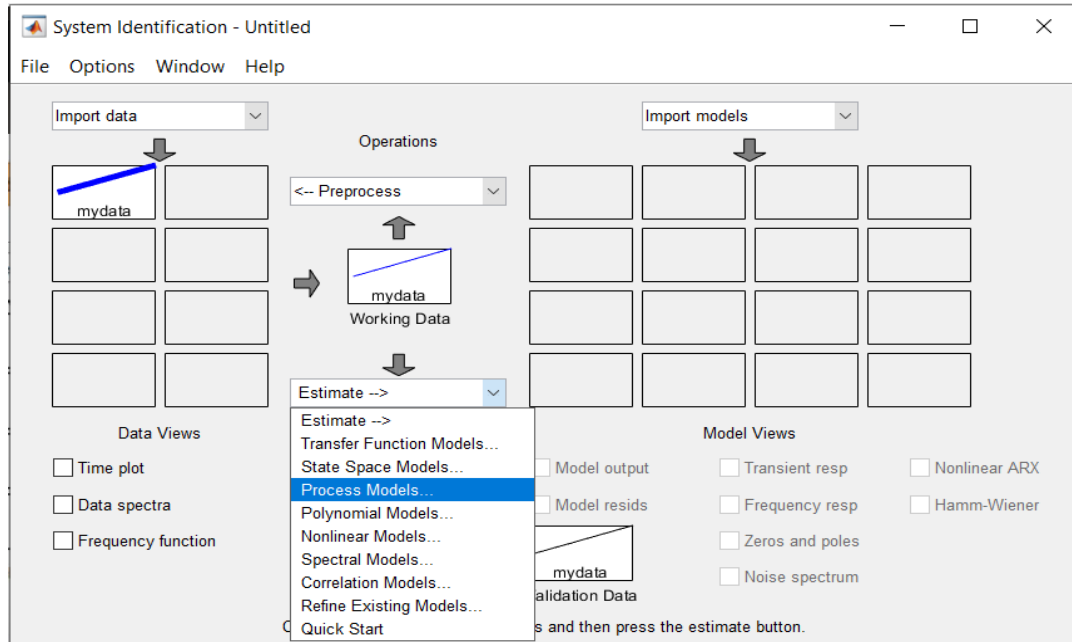


Рисунок 2.13 - Вікно робочого простору системи ідентифікації.

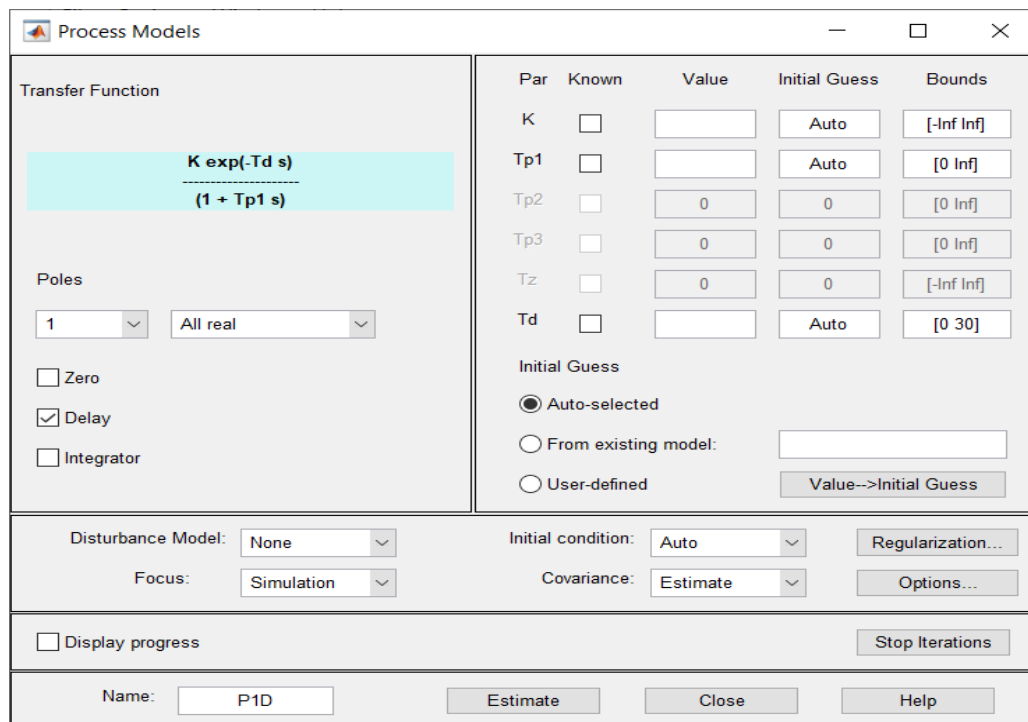


Рисунок 2.14 - Вікно робочого простору моделювання процесів

Далі змінюємо «initial condition» з «auto» на «zero», та натискаємо «estimate» і в нас у вікні робочого простору системи ідентифікації з'являється новий графік (та натискаємо «model output» і отримуємо у новому вікні параметри моделі (рис. 2.15 – 2.17).

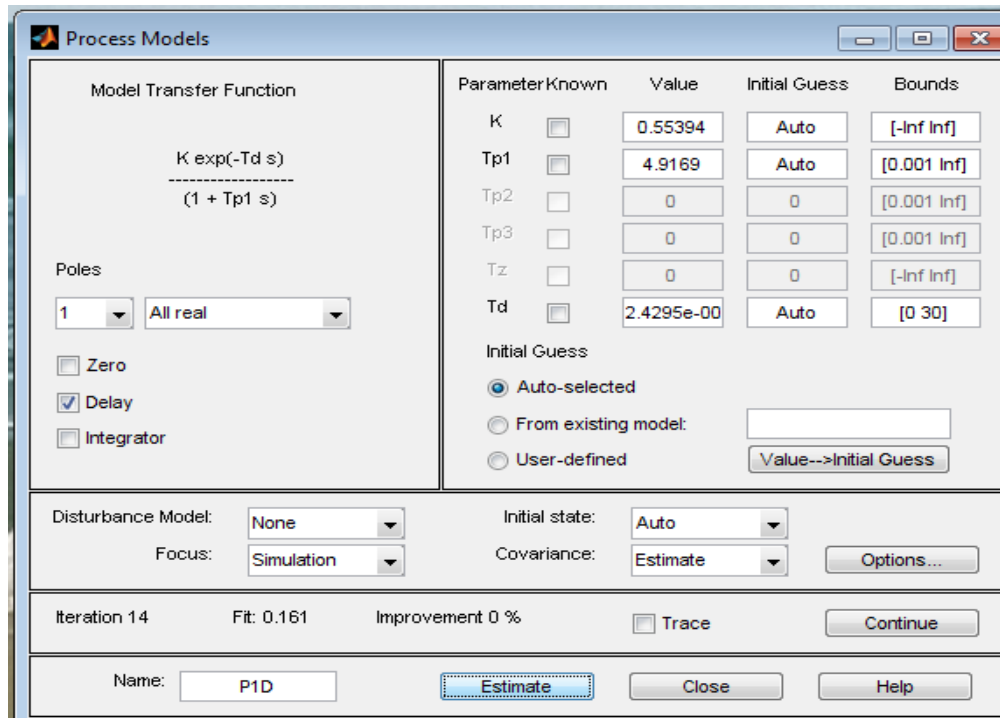


Рисунок 2.15 - Вікно робочого простору системи ідентифікації після моделювання процесів

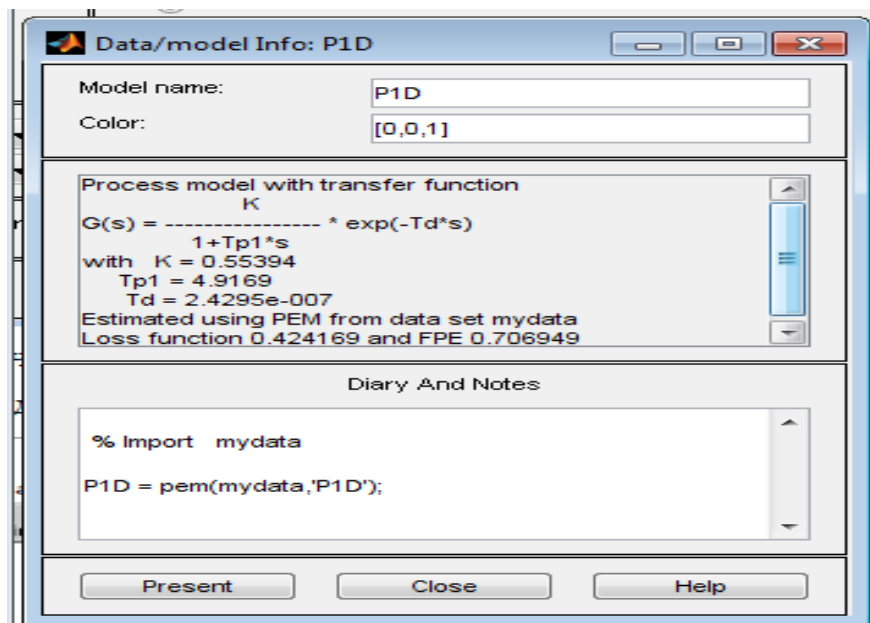


Рисунок 2.16 - Основні параметри налаштувань (числові значення), для опису математичної моделі з аперіодичною ланкою 1- го порядку

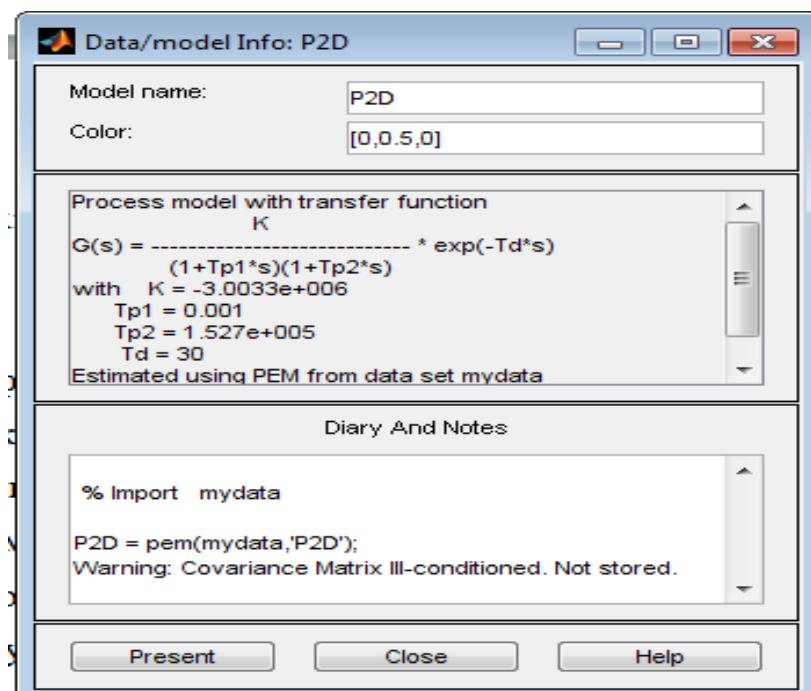


Рисунок 2.17 - Основні параметри налаштувань (числові значення), для опису математичної моделі (передавальної функції) - аперіодичної ланкт 2 -го порядку

Порівняльний аналіз експеримнтальних даних та даних отриманих за математичною моделлю (інерційної ланки другого порядку) представлено на рис. 2.18

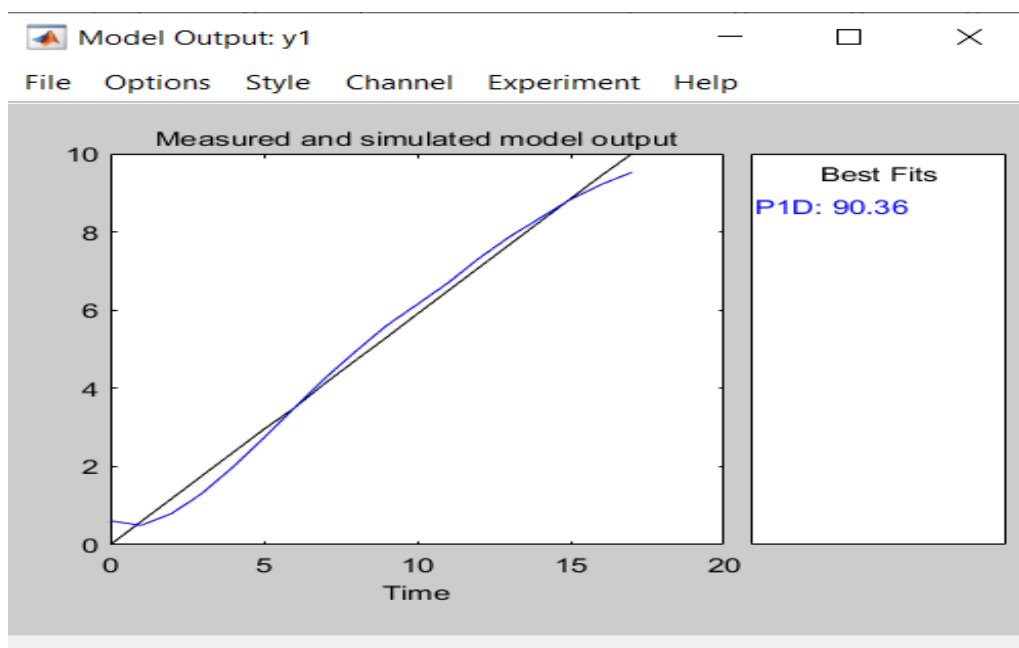


Рисунок 2.18. - Графік вихідного сигналу моделі (ланка 2 -го порядку)

Синя крива відповідає змодельованому математичному опису чорної кривої, яка побудована на основі введених даних, точність такої моделі 90, 36, але ця модель використовує для розрахунків аперіодичну ланку 1-го порядку, відповідно за таким самим принципом побудуємо і для аперіодичної ланок 2-го порядку (рис. 2.17)

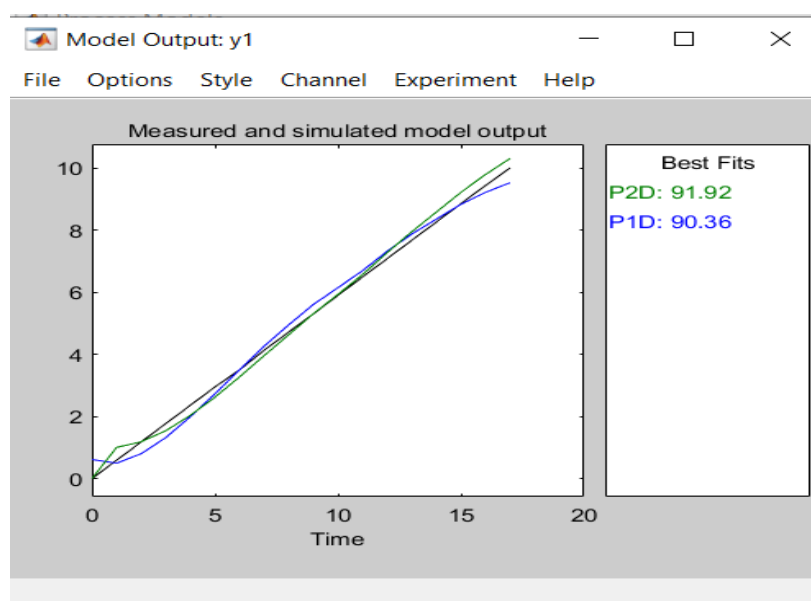


Рисунок 2.19. - Графік вихідного сигналу моделі (інерційних ланок 1-го та 2-го порядку) порівняння точності отриманих моделей

Також можна переглянути основні параметри налаштувань (числові значення), для кожної з моделей (аперіодичної ланки третього порядку) (рис.2.18),

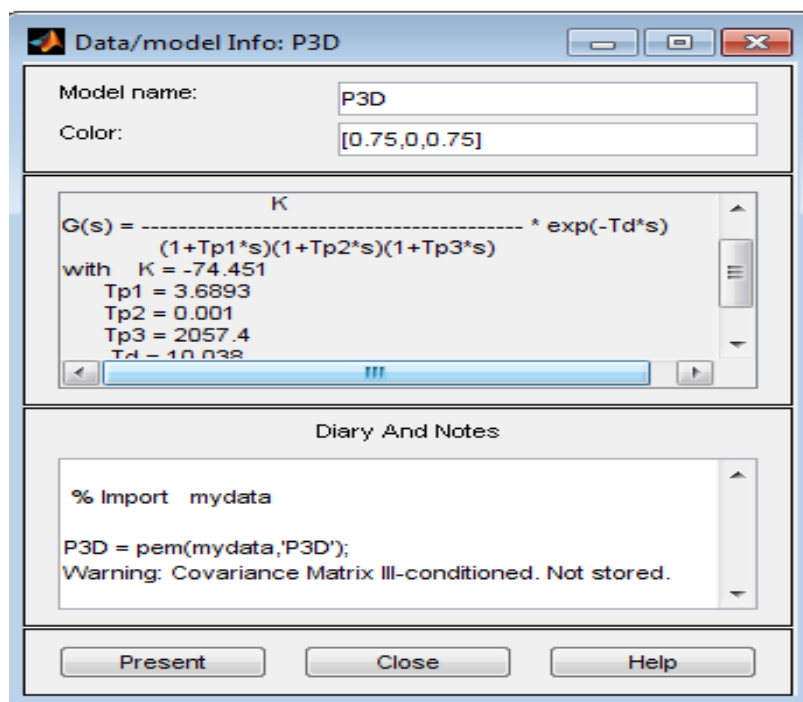


Рисунок 2.20. - Основні параметри налаштувань (числові значення), для опису математичної моделі з аперіодичною ланкою третього порядку

Порівняльний аналіз експериментальних даних та даних отриманих за математичними моделям представлено на рис. 2.21

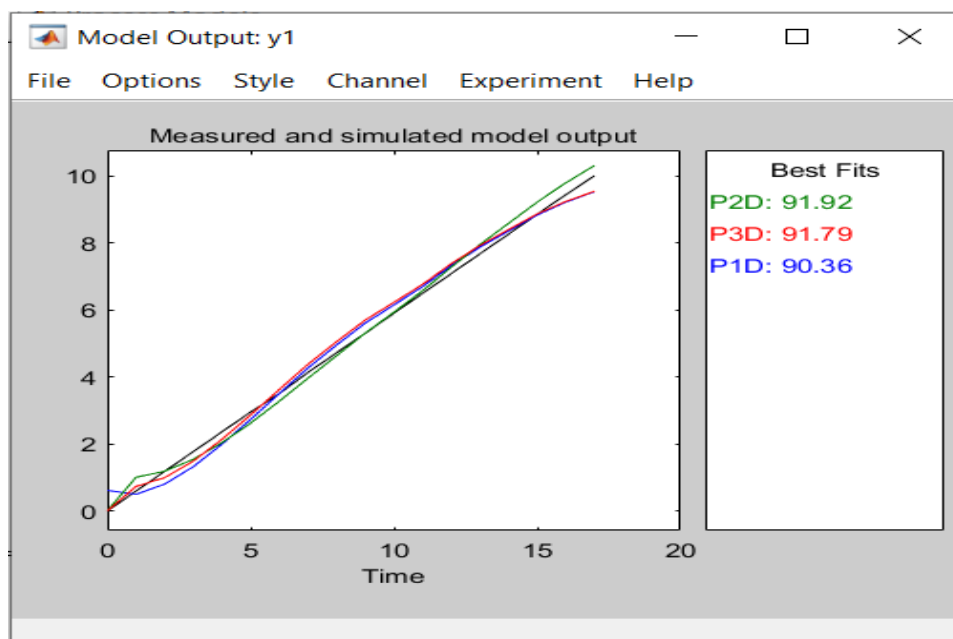


Рисунок 2.21 - Графіки вихідного сигналу (експеримент) та даних отриманих по математичним моделям СПК (ланок 1-го, 2-го та 3-го порядку)

Висновок по розділу

Таким чином, на нашу думку, порівняльний аналіз схем САУ горіння палива СПК дозволяє зробити висновок, що введення додаткового сигналу, що коригує зміст O_2 у димових газах підвищує точність підтримки оптимального надлишку повітря у системі регулювання економічності згорання палива. Додатковий коригуючий регулятор якої керує подачею повітря при топкових збуреннях і безпосередньо забезпечує підтримку заданого надлишку повітря в топці є перспективним технічним рішенням.

Розроблена математична модель СПК по каналу «зміст палива – зміст O_2 у димових газах» яка дозволяє оцінити динаміку САУ в різних режимах роботи СПК та є основою для подальшого аналізу та синтезу САУ горіння. Використання MatLab суттєво спростило процес побудови моделі та забезпечило високу точність результатів завдяки застосуванню сучасних методів обробки даних та ідентифікації систем.

Відповідно до отриманих результатів можна зазначити, що найкраща точність побудови згідно графіку (див. рис. 2.18) є точність (середнє квадратичне відхилення) - 91,92 %, для аперіодичної ланки першого порядку.

РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ ЕФЕКТИВНОСТІ ПРОЦЕСУ ГОРІННЯ

3.1. Вибір математического апарата

Передумовою розробки теорії нечітких множин є принцип несумісності, згідно з яким складність системи та точність, з якою її можна описати традиційними математичними методами, по суті суперечать один одному. Методи нечіткої логіки дозволяють будувати логіко-лінгвістичні моделі, що відображають загальну смислову постановку задачі, використовуючи якісні уявлення, що відповідають «людським» способам міркувань та прийняття рішень. Ефективність застосування апарату нечіткої логіки базується на ряді теорем, аналогічних теорем сенс яких зводиться до того, що система на основі алгоритму нечіткого виведення при виконанні певних, не дуже жорстких умов є універсальним апроксиматором.

Основна перевага систем з нечіткою логікою - це здатність використовувати умови та методи вирішення завдань, описані мовою, близькою до природного. Однак класичним системам з нечіткою логікою, властивим певне передумова так,: набір нечітких правил, вид і параметри функцій належності, що описують вхідні та вихідні змінні системи, а також вид алгоритму нечіткого висновку вибираються суб'єктивно експертом-людиною. Від досвіду, знань і кваліфікації залежить ефективна робота нечіткої системи управління або адаптації САУ [11].

Нечітка логіка — набір нестрогих правил, у яких досягнення поставленої мети можуть використовуватися радикальні ідеї, інтуїтивні здогади, і навіть досвід фахівців, накопичений у відповідній галузі. Нечіткої логіки властива відсутність суворих стандартів. Найчастіше вона застосовується в експертних системах, нейронних мережах та системах штучного інтелекту. Замість традиційних значень «Істина» і «Брехня» в нечіткій логіці використовується ширший діапазон значень, серед яких Істина, Брехня, Можливо, Іноді, Не

пам'ятаю (Як би Так, Чому б і Ні, Ще не вирішив...). Нечітка логіка просто незамінна в тих випадках, коли на поставлене запитання немає чіткої відповіді (так чи ні; 0 або 1) або наперед невідомі всі можливі ситуації. Наприклад, у нечіткій логіці висловлювання виду «X є велике число» інтерпретується як має неточне значення, яке характеризується деяким нечітким безліччю. «Штучний інтелект та нейронні мережі – це спроба змодельовати на комп'ютері поведінку людини. Оскільки люди рідко бачать навколишній світ лише у чорно-білому кольорі, виникає у використанні нечіткої логіки» [12].

Основні етапи системи нечіткого виведення

Системи нечіткого виведення призначені для перетворення значень вхідних змінних процесу управління у вихідні змінні на основі використання нечітких правил продукцій. Для цього системи нечіткого виведення повинні містити базу правил нечітких продукцій і реалізовувати нечітке виведення висновків на основі посилок або умов, представлених у формі нечітких лінгвістичних висловів.

Таким чином, основними етапами нечіткого виведення є (рис. 8.3).

1. Формування бази правил систем нечіткого виведення.
2. Фазифікація вхідних змінних.
3. Агрегація підумов в нечітких правилах продукцій

$$T(\tilde{A} \wedge \tilde{B}) = \min\{T(\tilde{A}), T(\tilde{B})\}.$$

4. Активізація або композиція підвисновків в нечітких правилах продукцій.

5. Акумуляція висновків нечітких правил продукцій.
6. Дефазифікація

$$y = \frac{\sum_{i=1}^n x_i * \mu(x_i)}{\sum_{i=1}^n \mu(x_i)},$$

База правил нечітких продукцій є скінченною множиною правил нечітких продукцій, що узгоджені відносно до використовуваних в них лінгвістичних

змінних. Найчастіше база правил представляється у формі структурованого тексту:

$$\begin{aligned} &\text{Правило_1: ЯКЩО "Умова_1" ТО "Висновок_1" (F1)} \\ &\text{Правило_2: ЯКЩО "Умова_2" ТО "Висновок_2" (F2)} \\ &\text{Правило_n: ЯКЩО "Умова_n" ТО "Висновок_n" (Fn)} \end{aligned} \quad (3.1)$$

або в еквівалентній формі:

$$\begin{aligned} &\text{RULE_1: IF Condition_1 THEN Conclusion_1 (F1)} \\ &\text{RULE_2: IF Condition_2 THEN Conclusion_2 (F2)} \\ &\text{RULE_n: IF Condition_n THEN Conclusion_n (Fn)} \end{aligned} \quad (3.2)$$

Тут через F_i ($i \in \{1, 2, \dots, n\}$) позначені *коефіцієнти визначеності* або вагові коефіцієнти відповідних правил. Ці коефіцієнти можуть приймати значення з інтервалу $[0, 1]$. У випадку якщо ці вагові коефіцієнти відсутні, зручно прийняти, що їх значення дорівнюють 1.

Узгодженість правил відносно використовуваних лінгвістичних змінних означає, що в якості умов і висновків правил можуть використовуватися тільки нечіткі лінгвістичні вислови вигляду (3.1) і (3.2), при цьому в кожному з нечітких висловів повинні бути визначені функції приналежності значень терм-множин для кожної з лінгвістичних змінних.

Всі етапи алгоритму І. Мамдані працюючого за двома правилами вмда ЯКЩО..ТО.. показані на рис. 3.1.

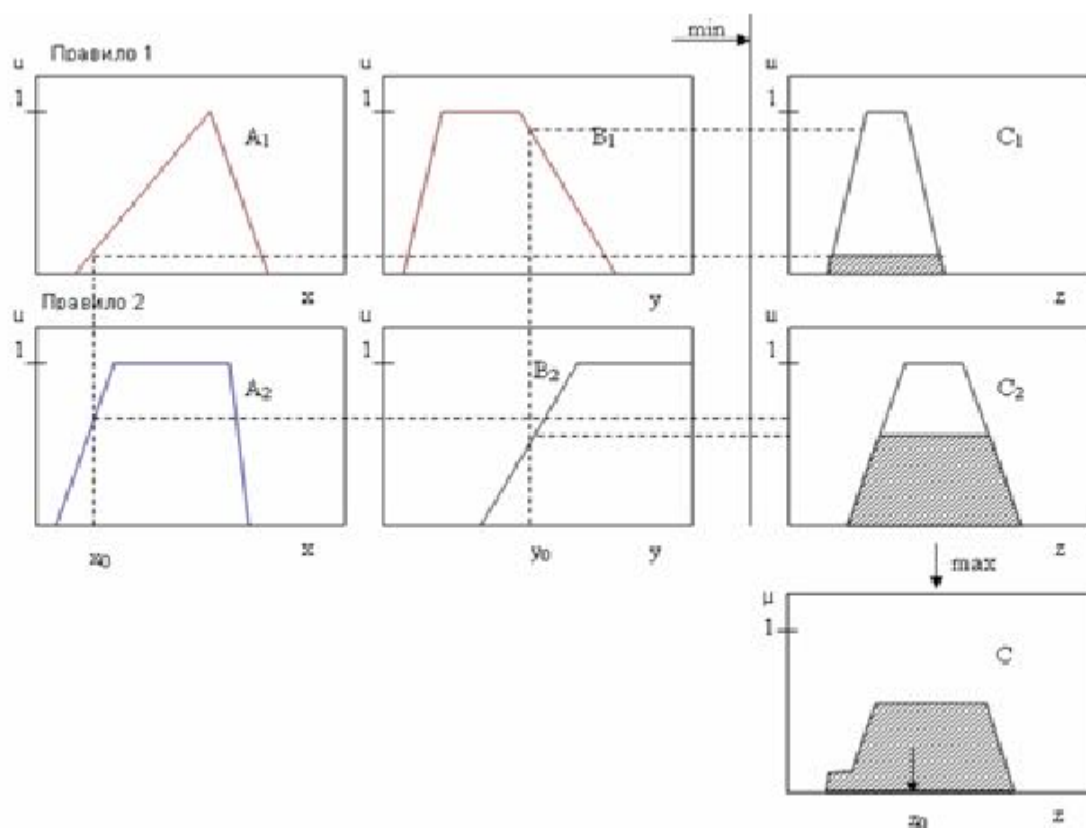


Рисунок 3.1. - Етапи алгоритму І. Мамдані [10]

3.2. Удосконалення структури САУ процесу горіння

На практиці величину α і повноту згорання палива оператори агрегатів СЕУ непрямо контролюють за кольором полум'я в топці і диму, що виходить з труби. При хорошому горінні полум'я повинно бути світло-жовтим або помаранчевим без почервоніння або потемніння в окремих ділянках топки, а дим - світло-сірим або коричневим. Темно-червоне полум'я і темний дим свідчать про нестачу повітря, а світлий вогонь з іскрами і білуватий дим - про надмірне надлишку. Ознакою незадовільної розпилювання палива є поява в полум'я темно-червоних смуг. Про повноту згорання палива можна судити за кольором полум'я в топці котла і за кольором диму, що виходить з димової труби СПУ. Ознакою повного горіння палива в судновому парогенераторі є світло-жовте полум'я в топці [7].

Колір факела (полум'я) пальника під час згоряння рідкого палива в паровому котлі. Колір полум'я пальника є важливим візуальним показником правильності процесу горіння. Він безпосередньо пов'язаний із якістю розпилення палива, співвідношенням повітря та палива, температурою горіння й повнотою згоряння.

Опис експерта про колір полум'я горілки котла, що працює на мазуті, і що кожен колір означає:

1. Світло-блакитне з жовтим відтінком

Це найкращий варіант полум'я.

Горіння відбувається повно і стабільно, подача повітря та мазуту збалансована. Температура висока, зола й сажа не утворюються, втрати тепла мінімальні. Таке полум'я свідчить про економну та екологічну роботу котла.

2. Темно-блакитне або синє

Означає дуже добре змішування мазуту з повітрям. Горіння чисте, без коптіння, температура стабільна. Це також ознака правильної роботи форсунок і достатнього доступу кисню.

3. Яскраво-жовте

Полум'я мерехтливе, іноді коптить — це ознака неповного згоряння.

Повітря подається недостатньо, частина мазуту не згорає, утворюються сажисті частинки та чадний газ (CO). ККД котла знижується, пальник може швидко забруднюватися.

4. Помаранчеве або червонувате

Горіння нестійке, довге полум'я — свідчить про надлишок палива або погане розпилення мазуту. Температура в топці падає, утворюється дим і сажа. Це призводить до зниження ефективності котла та потребує регулювання подачі повітря чи очищення форсунок.

5. Білувато-жовте

Полум'я дуже яскраве, гаряче — це надлишок повітря у камері згоряння. Температура надто висока, можливий перегрів і пошкодження форсунок. Таке горіння неекономне, бо частина тепла втрачається з димовими газами.

6. Темно-червоне або тьмяне

Це найгірший варіант — полум'я слабке й нестійке. Температура низька, мазут погано розпилюється та не встигає випаровуватися. У результаті утворюється багато сажі, диму, знижується ККД і збільшується навантаження на систему очищення.

Висновок: Для мазутних котлів оптимальним є блакитно-жовте або темно-блакитне полум'я. Воно свідчить про повне згоряння палива, стабільну роботу пальника та високу теплову ефективність. Жовті, червоні чи тьмяні відтінки означають, що потрібне регулювання подачі повітря або очищення форсунки.

З урахуванням важливості, для ефективної роботи САУ процесу горіння різного виду палива в СПУ кольору диму і полум'я пальника, до САУ горіння (див. рис. 3.2) пропонується додатковий контур оцінки даних параметрів, що діє за алгоритмом І. Мамдані [7] і видає оцінку ефективності процесу горіння палива в СПК.

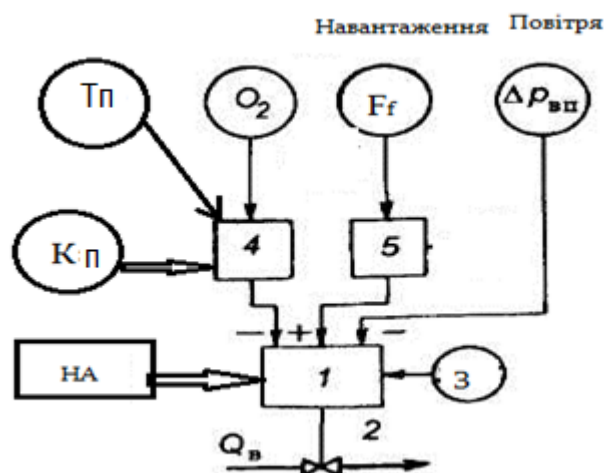


Рисунок 3.2 - Запропонована структура процесу горіння палива із введенням додаткових каналів за цвітом (Кп) та типом (Тп) полум'я горілки

Для розробки автоматичної системи оцінювання ефективності горіння була посоена таблиця 3.1.

Таблиця 3.1 - Колір полум'я горілки та характеристика процесу горіння

Колір полум'я	Коефіцієнт надлишку повітря α	Інтенсивність полум'я	Характеристика процесу горіння
Світло - блакитне	1.05 – 1.15	Рівне, спокійне	Повне згоряння палива (оптимальне)
Темно - блакитне	1.10-1.20	Стабільне	Правильна робота форсунок і достатнього доступу кисню. (Добре)
Жовте або яскраво-жовте	< 1.0	Мерехтливе	Неповне згоряння, нестача повітря (задовільно).
Помаранчеве або червонувате	0.85-0.95	Нестійке	Перегрів, надлишок повітря (погано). Зниження ККД.
Білувате	1.23 – 1.40	Дуже яскраве	Надлишок повітря (дуже погано) можливий перегрів і пошкодження форсунок.
Темно-червоне	<0.8	Нестійке	Мазут погано розпилюється та не встигає випаровуватися (Аварійна ситуація)

Для освоєння пальників СПК датчиками контролю кольору полум'я було проведено аналіз принципів роботи датчиків та здійснено вибір засобу контролю.

Принцип роботи: датчик аналізує світло, що випромінюється полум'ям. Зазвичай він використовує джерело світла, яке висвітлює полум'я та/або реєструє світло, відбите від нього. Потім датчик визначає співвідношення інтенсивності світла у різних спектральних діапазонах (наприклад, синьому, зеленому та червоному).

Типи датчиків [12]:

Широкосмугові: Використовують джерело світла, що охоплює широкий спектр, та реєструють відбите світло.

Спектральні: Вимірюють світло, що випромінюється полум'ям у синьому, зеленому та червоному діапазонах, щоб визначити його спектральні характеристики.

Застосування: Датчики кольору використовуються для контролю процесу горіння, а датчики полум'я можуть просто визначати наявність або відсутність полум'я, перетворюючи світловий сигнал на електричний.

Датчик кольору та інтенсивності полум'я TCS230 поєднує в собі кремнієві фотодіоди, що настроюються, і перетворювач струм-частота на одній монолітній КМОП-мікросхемі. Повномасштабна вихідна частота цього датчика кольору може бути розширена за допомогою одного з трьох встановлених значень, що подаються через два вхідні контакти. TCS230 поставляються з цифровим входом та виходом, які дозволяють безпосередньо підключатися до мікроконтролера [13].



Рис. 3.3. - Датчик світла факела горілки TCS230

Характеристики датчика:

- тип: TCS230
- вхідна напруга: 3В ~ 5В
- оптимальна відстань визначення кольору: 10мм
- високоякісна конвертація інтенсивності світла у частоту
- програмований колір та повномасштабна вихідна частота
- підключення безпосередньо до мікроконтролера
- розмір плати 30 x 24 мм

Спектральні характеристики цитетової гами датчика показано на рис. 3.4.

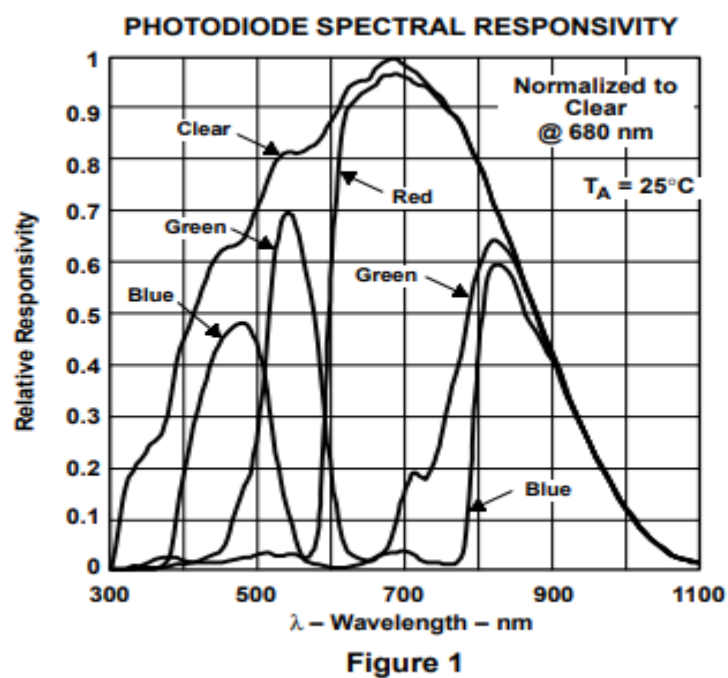


Рисунок 3.4. - Параметри датчика TCS230

3.3. Розробка нечіткої експертної системи для контролера подачі повітря

Надавши кожному кольору відповідну шкалу, програма розраховує коефіцієнт надлишку повітря в топці і показує ефективність процесу горіння палива. Кожному вхідному та вихідному значенню параметрів оцінки ефективності присвоюється ваговий коефіцієнт в інтервалі від 0 до 1 виходячи з інформації табл.3.1.

Нечіткий контролер, що виступає в якості блоку обробки інформації, визначає коефіцієнт бітка повітря і порівнює його із завданням. Також корекція α може здійснюватися за показаннями киснедоміру в газах. Контроль α у топці дозволяє оперативно оцінити якість процесу горіння без запізнення на отримання інформації від газоаналізатора (до 5 хв).

Вхідними параметрами в нечітку експертну систему є інтенсивність і колір полум'я пальника (оцінювань за допомогою фотодатчиків), а вихідним – коефіцієнт надлишку повітря α (рис. 3.5).

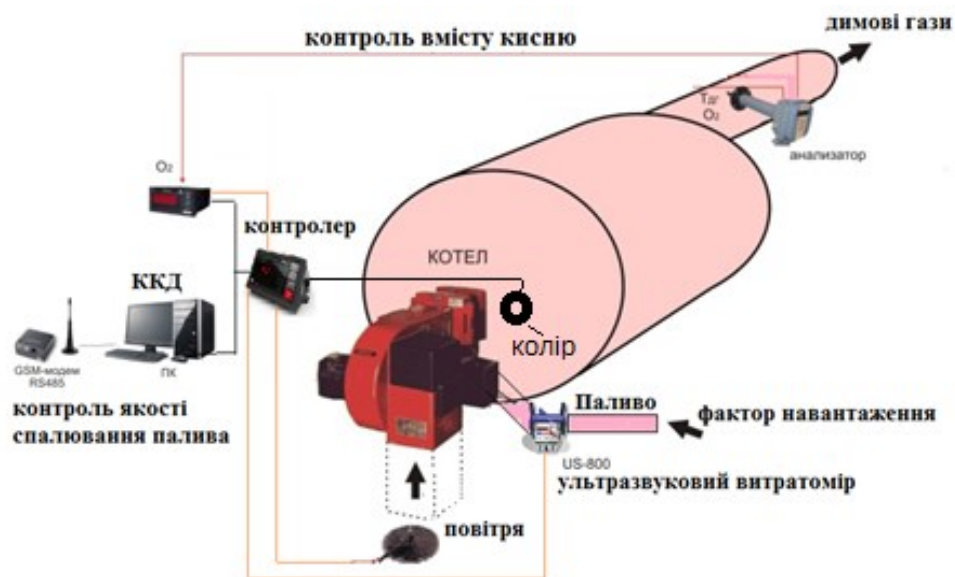


Рисунок 3.5. - Схема САУ процесу оптимізації горіння палива в СПК

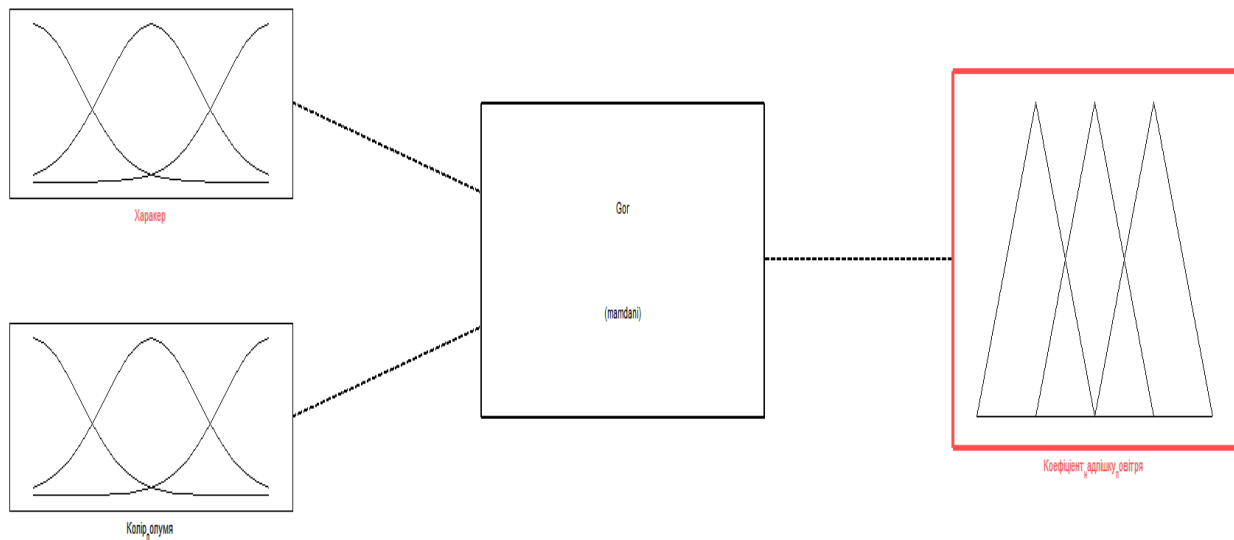


Рисунок 3.6. - Вікно входних та вихідних параметрів бази знань у програмі фаззи
ЛОДЖИК

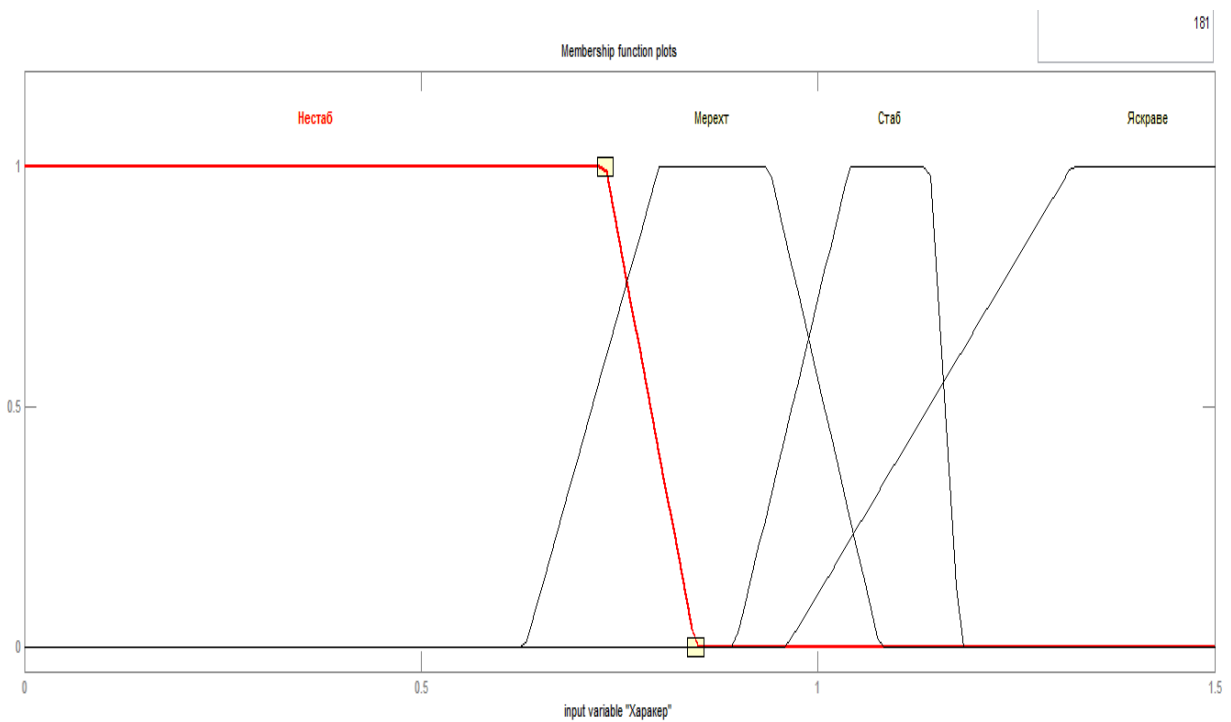


Рисунок 3.7. - Етап фазифікації параметра «Інтенсивність полум'я»

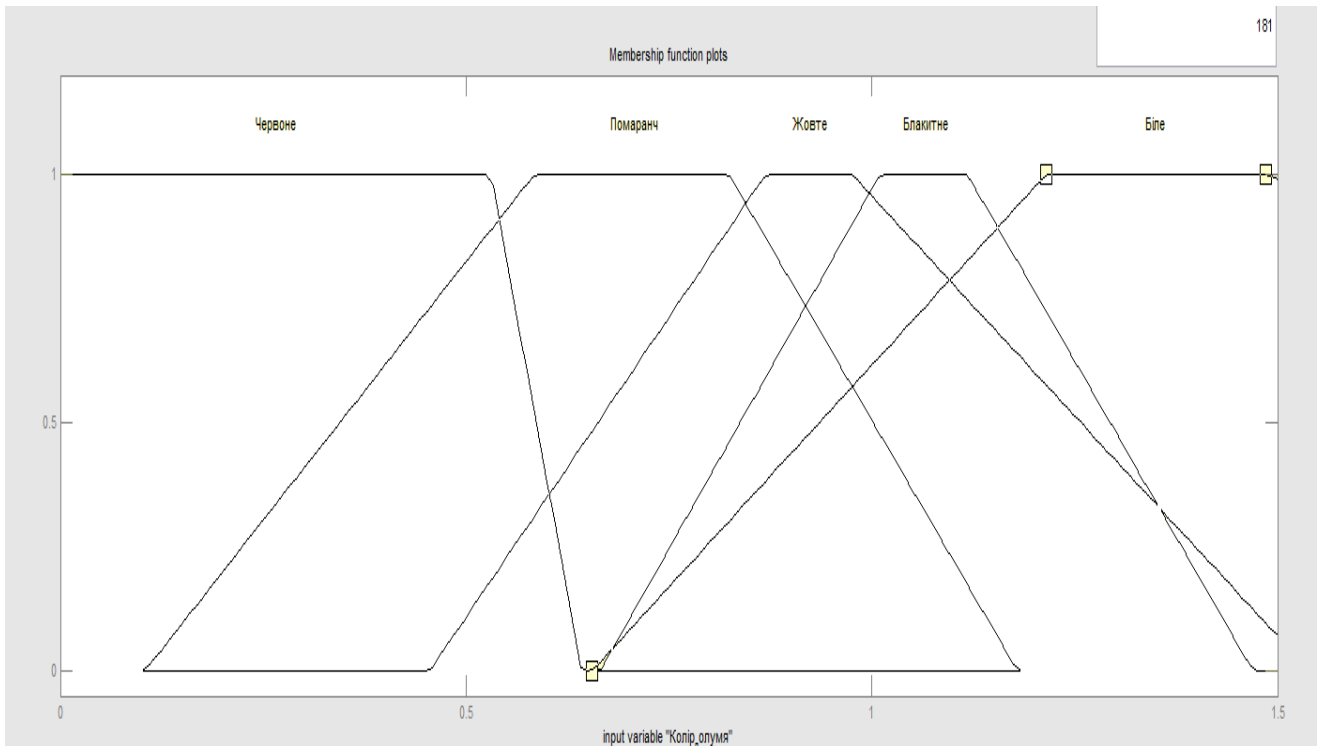


Рисунок 3.8. - Етап фазифікації параметра «колір полум'я» в програмі FTL

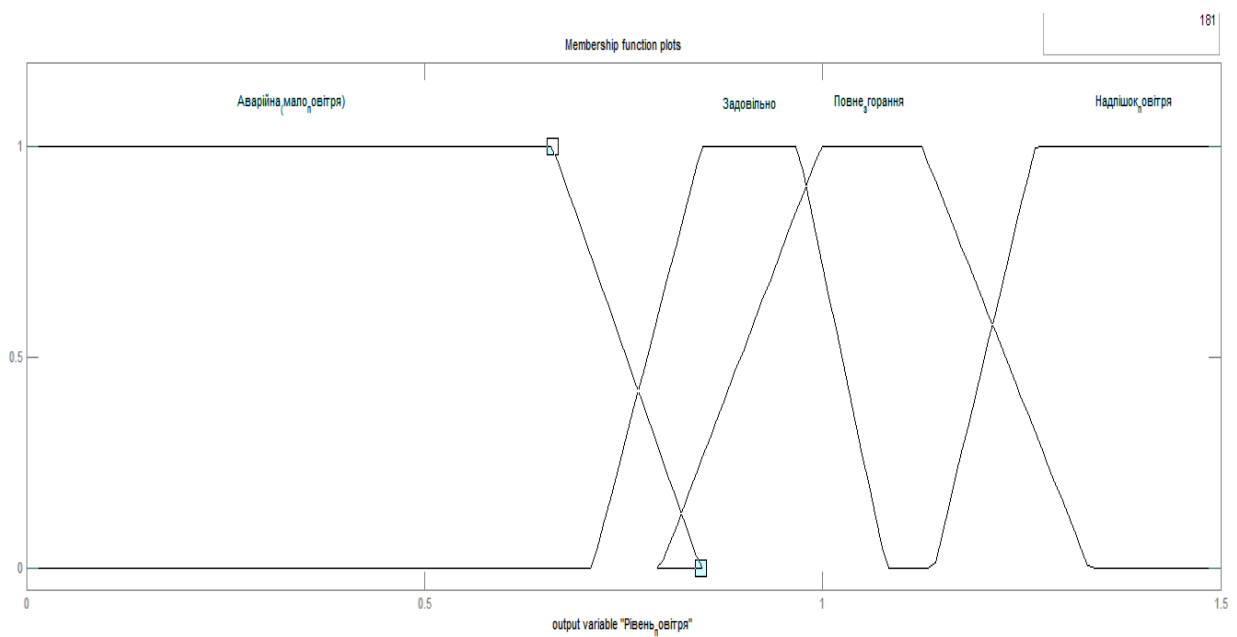


Рисунок 3.9. - Етап фазифікації параметра «коефіцієнт надлишку повітря»

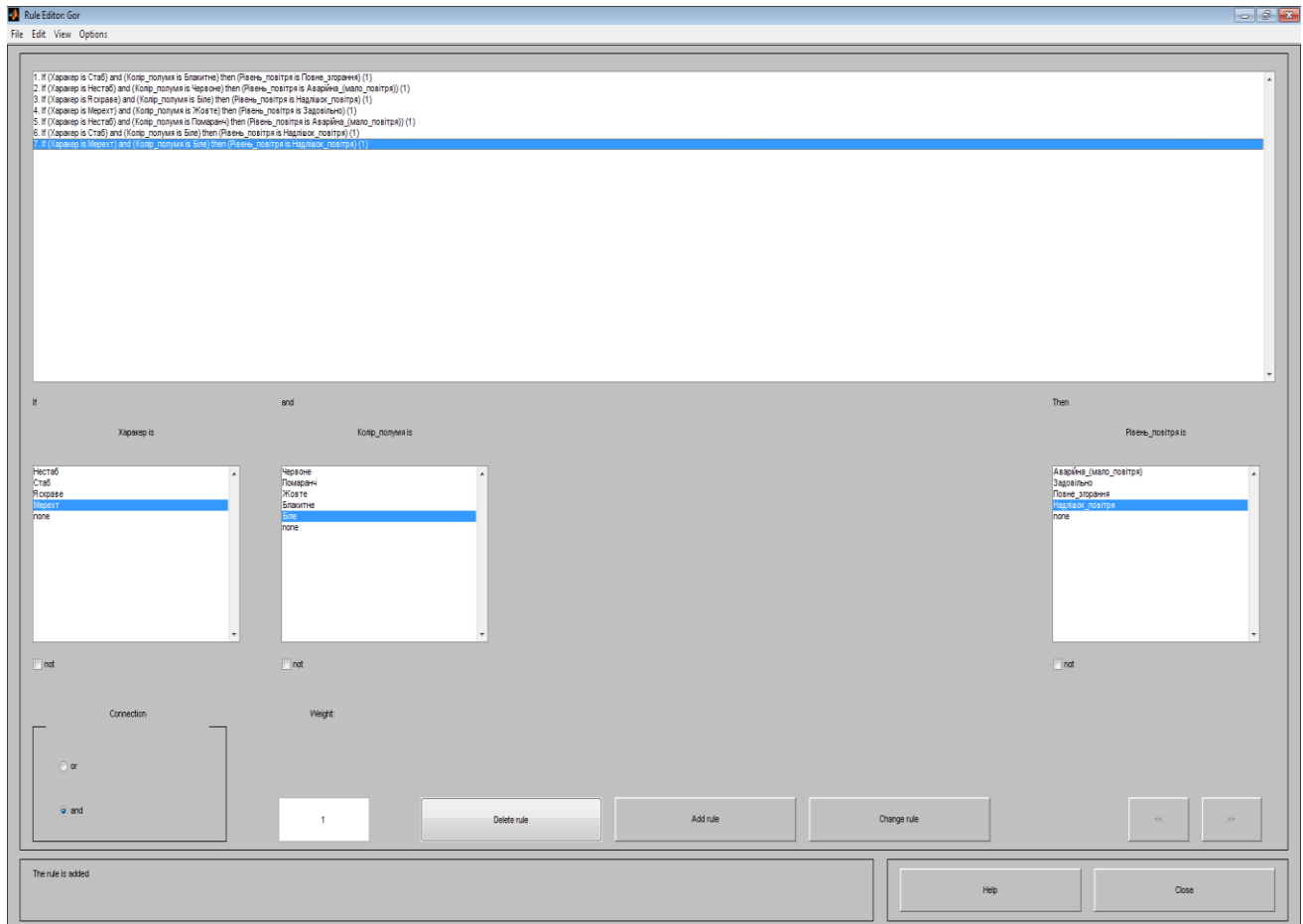


Рисунок 3.10 - Фрагмент розробки бази знань вигляду «ЯКЩО УМОВА 1 І
УМОВА 2..ТО ВИСНОВОК..»

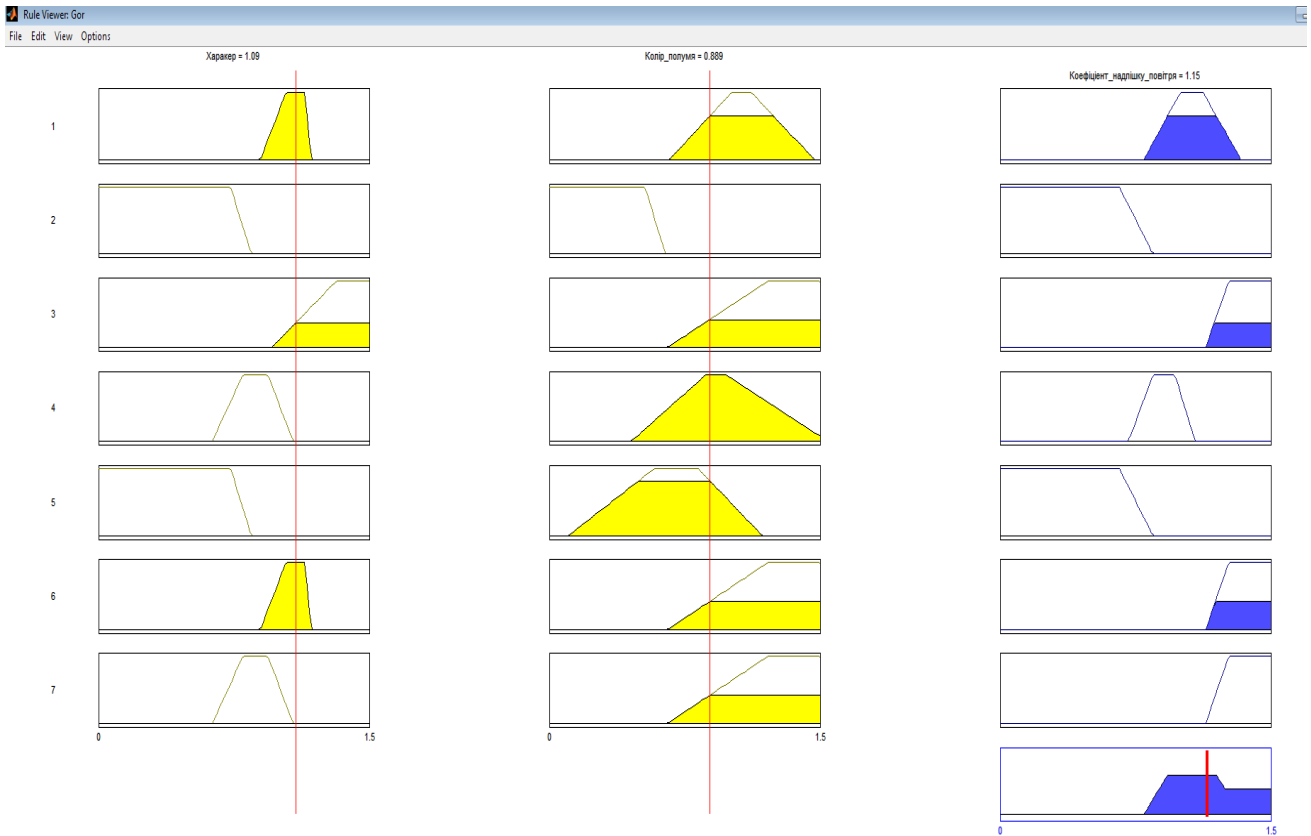


Рисунок 3.11. - Робота ЕС в програмі по визначенню α : значення α рівне 1,15
указує на повне згоряння палива в топці допоміжного СПК

Для розробки експертної системи допомоги оператора СПК було використано програмну платформу гугл – колаб.

Google Colab (Google Colaboratory) – це безкоштовний хмарний сервіс для програмування на Python. Програма написана за допомогою інтелектуальних чат-ботів [14].

Експертна система: оцінка процесу горіння

Вхід: колір полум'я + характер полум'я

Вихід: орієнтовний коефіцієнт надлишку повітря (α) та характеристика процесу горіння

Таблиця відповідності кольору і характеру до типового процесу горіння

combustion_table = [

("світло-блакитне з жовтим відтінком", "рівне, стабільне", 1.10, "Оптимальне повне згоряння палива, високий ККД."),

("блакитне", "стабільне", 1.05, "Повне згоряння палива, ефективна робота котла."),

("синє", "рівне, спокійне", 1.15, "Повне згоряння, мінімальні втрати і викиди."),

("білувате", "дуже яскраве", 1.30, "Надлишок повітря — можливі втрати тепла."),
 ("жовте", "мерехтливе", 0.95, "Неповне згоряння, нестача повітря, утворення сажі."),
 ("яскраво-жовте", "коптить, нестійке", 0.90, "Неповне горіння, надлишок палива, низький ККД."),
 ("помаранчеве", "нестійке", 0.85, "Недостатнє змішування, низька якість палива."),
 ("червоне", "тьмяне", 0.80, "Недостатня температура горіння, неповне згоряння."),
]

```
def assess_combustion(color: str, character: str):
```

```
    """
```

```
    Функція підбирає орієнтовний коефіцієнт  $\alpha$  і характеристику процесу.  

    Якщо збіг не знайдено — пропонує стандартну відповідь.
```

```
    """
```

```
    color = color.strip().lower()
```

```
    character = character.strip().lower()
```

```
    for entry in combustion_table:
```

```
        c, h, alpha, desc = entry
```

```
        if c == color and h == character:
```

```
            print("\n=== РЕЗУЛЬТАТ ОЦІНКИ ===")
```

```
            print(f"Колір полум'я: {c.capitalize()}")
```

```
            print(f"Характер полум'я: {h.capitalize()}")
```

```
            print(f"Орієнтовний коефіцієнт надлишку повітря ( $\alpha$ ): {alpha}")
```

```
            print(f"Характеристика процесу горіння: {desc}")
```

```
            return
```

```
    Якщо збіг не знайдено
```

```
    print("\n=== РЕЗУЛЬТАТ ОЦІНКИ ===")
```

```
    print(f"Колір: {color.capitalize()}, характер: {character.capitalize()}")
```

```
    print("Дані не знайдені у базі — потрібен додатковий аналіз.")
```

```
    print("Ймовірно, процес горіння нестабільний або параметри поза нормою.")
```

```
--- Запуск ---
```

```
color_in = input("Введіть колір полум'я (наприклад: блакитне, жовте, червоне): ")
```

```
character_in = input("Введіть характер полум'я (наприклад: стабільне,  
мерехтливе, тьмяне): ")
```

assess_combustion(color_in, character_in)

```

[3] 57 сек.
Функція підбирає орієнтовний коефіцієнт  $\alpha$  і характеристику процесу.
Якщо збіг не знайдено – пропонує стандартну відповідь.
"""

color = color.strip().lower()
character = character.strip().lower()

for entry in combustion_table:
    c, h, alpha, desc = entry
    if c == color and h == character:
        print("\n=== РЕЗУЛЬТАТ ОЦІНКИ ===")
        print(f"Колір полум'я: {c.capitalize()}")
        print(f"Характер полум'я: {h.capitalize()}")
        print(f"Орієнтовний коефіцієнт надлишку повітря ( $\alpha$ ): {alpha}")
        print(f"Характеристика процесу горіння: {desc}")
        return

# Якщо збіг не знайдено
print("\n=== РЕЗУЛЬТАТ ОЦІНКИ ===")
print(f"Колір: {color.capitalize()}, характер: {character.capitalize()}")
print("Дані не знайдені у базі – потрібен додатковий аналіз.")
print("Ймовірно, процес горіння нестабільний або параметри поза нормою.")

# --- Запуск ---
color_in = input("Введіть колір полум'я (наприклад: блакитне, жовте, червоне): ")
character_in = input("Введіть характер полум'я (наприклад: стабільне, мерехтливе, тьмяне): ")

assess_combustion(color_in, character_in)

```

Введіть колір полум'я (наприклад: блакитне, жовте, червоне): блакитне
 Введіть характер полум'я (наприклад: стабільне, мерехтливе, тьмяне): стабільне

=== РЕЗУЛЬТАТ ОЦІНКИ ===
 Колір полум'я: Блакитне
 Характер полум'я: Стабільне
 Орієнтовний коефіцієнт надлишку повітря (α): 1.05
 Характеристика процесу горіння: Повне згоряння палива, ефективна робота котла.

Рисунок 3.12 - Скиншот кода програми (експертної системи) оцінки якості горіння палива в судовому котлі

Введіть колір полум'я (наприклад: блакитне, жовте, червоне): жовте

Введіть характер полум'я (наприклад: стабільне, мерехтливе, тьмяне): мерехтливе

=== РЕЗУЛЬТАТ ОЦІНКИ ===

Колір полум'я: Жовте

Характер полум'я: Мерехтливе

Орієнтовний коефіцієнт надлишку повітря (α): 0.95

Характеристика процесу горіння: Неповне згоряння, нестача повітря, утворення сажі.

Висновки у розділі

Визначення кольору факела горілки є важливим індикатором ефективності процесу згоряння палива в топці котла. Колір полум'я відображає співвідношення між паливом і повітрям, температуру горіння та ступінь повноти згоряння. Світло-блакитний або білуватий факел свідчить про оптимальний коефіцієнт надлишку повітря і повне згоряння палива, тоді як жовтий чи червонуватий відтінок вказує на нестачу повітря, утворення сажі та зниження ефективності процесу.

Використання експертної системи контролю на основі нечіткої логіки дозволяє автоматизовано аналізувати параметри горіння, у тому числі колір полум'я, температуру, вміст кисню та оксидів у димових газах. Такий підхід дає змогу оцінювати ефективність горіння навіть за неповних або нечітких даних, що є типовим для реальних умов експлуатації котлів. Розроблена система може формувати рекомендації для оператора щодо регулювання подачі повітря чи палива з метою досягнення максимальної енергоефективності та мінімізації шкідливих викидів.

Отже, поєднання оптичного контролю кольору факела з інтелектуальними методами нечіткої логіки підвищує надійність і точність оцінки процесу горіння, сприяє зниженню витрат палива та покращує екологічні показники роботи котлоагрегатів.

РОЗДІЛ 4. МОДЕЛЮВАННЯ НЕЧІТКОЇ АДАПТИВНОЇ СИСТЕМИ РЕГУЛЮВАННЯ КОЕФІЦІЄНТА НАДЛІШКУ ПОВІТРЯ

4.1. Розробка адаптивної САУ

Методи адаптивного налаштування регуляторів, не є оптимальними при сильних збуреннях на об'єкти управління і можуть бути покращені за допомогою подальшого підстроювання коефіцієнтів ПІД - регулятора. Підстроювання настроювальних параметрів може бути виконано оператором на підставі правил або автоматично, за допомогою блоку нечіткої логіки (рис. 3.1). Блок нечіткої логіки (фаззи-блок) використовує базу правил підстроювання та методи нечіткого виведення. Фаззи-підстроювання дозволяє зменшити перерегулювання, знизити час встановлення та підвищити робастність ПІ – регулятора.

Необхідність автоналаштування ПІ-регулятора, регулятор потребує налаштування параметрів K_p та K_i (Ти) для досягнення оптимальної продуктивності системи. Однак параметри, які підходять для одного режиму роботи системи, можуть не працювати в інших умовах, особливо у разі зміни параметрів об'єкта керування. Автоналаштування ПІ-регулятора дозволяє автоматизувати процес вибору оптимальних параметрів, щоб забезпечити стабільну роботу системи за зміни зовнішніх умов або характеристик об'єкта управління.

Експертні системи для автоналаштування ПІ-регуляторів використовують набір правил (евристики), які дозволяють автоматично вибирати значення параметрів K_p та K_i , ґрунтуючись на параметрах роботи системи, що спостерігаються.

Одним із ефективних методів автоматичного налаштування ПІ-регуляторів є використання нечіткої логіки. Нечітка логіка – це метод обробки інформації, який працює з невизначеними та приблизними даними. У традиційних системах використовується чітка (двійкова) логіка, де всі змінні мають чітко визначені

значення. Нечітка логіка, навпаки, працює з діапазонами значень від 0 до 1, що дозволяє моделювати гнучкіші та адаптивні системи [9].

У разі ПІ -регуляторів нечітка логіка може використовуватися для [6]:

- Аналізу помилок та їх змін;
- Прийняття рішень про коригування коефіцієнтів K_p , K_i , K_d залежно від стану системи управління;
- Автоматичне регулювання 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.
- Оптимізація якості управління: Автоматичне налаштування ПІД-регулятора знижує статичну помилку, підвищує стійкість та точність системи.

Для оптимізації САУ в умовах, коли очікувані критерії якості процесів експлуатації не відповідають встановленим, тобто близькі до передаварійного стану і зупинки СПУ, пропонується метод розробки експертної системи адаптації. Проектована НЕС, реалізована в нечіткому адаптері, діє за алгоритмом І. Мамдані [7]. Для підвищення ефективності процедури адаптації САУ параметра СПК запропонована структура (рис. 4.1), діюча за допомогою нечіткого адаптивного пристрою (нечіткого адаптера на базі нечіткого мікроконтролера марки Motorola 68HC12) . Пропонований метод і реалізує його структура, на прикладі адаптації ПІ-регулятора в САУ тиску пара СПУ, моделюється в умовах імітації впливу каналів збурень у вигляді змін значень параметрів передавальних функцій об'єкта по каналах управління і зовнішнього збурення).

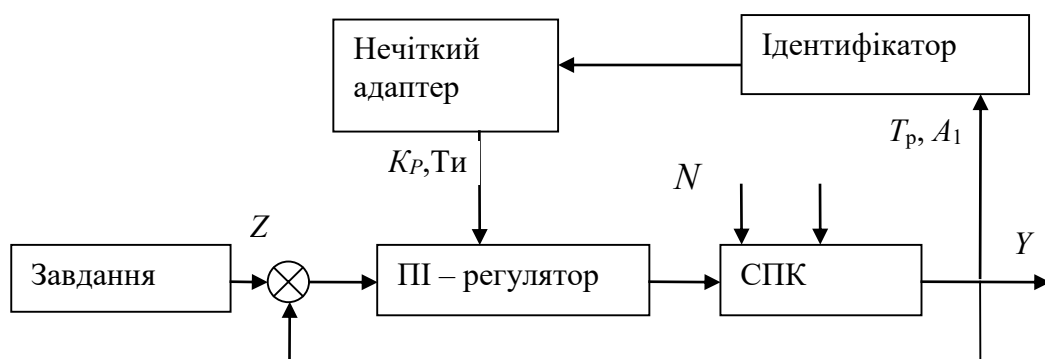


Рисунок 4.1. - Структура нечіткої адаптації САУ СПК стабілізації коефіцієнта надлишку повітря [19]:

N – зовнішні збурення; Z – завдання; T_p – час регулювання; A_1 – перша амплітуда перехідного процесу; Y – вихідне значення; K_p – коефіцієнт пропорційності; T_i – постійна інтегрування (настройки ПІ-регулятора)

Запропонований метод розробки ЕС до коригування параметрів настройки ПІ-регуляторів у процесі адаптації та оптимізації к умовам експлуатації, використовує базу знань експерта для нечіткого адаптера у вигляді насупних лінгвістичних правил [10]:

- якщо перехідний процес характеризується слабкою коливальністю (або відсутністю такої), але великою тривалістю, то настройку K_p регулятора слід збільшувати, а налаштування T_i зменшувати;

- якщо перехідний процес носить сильно виражений коливальний характер, то K_p повинен бути зменшений і т.п.

Для проведення моделювання допускається, що структура передатної функції об'єкта (суднового утилізаційного парогенератора фірми Лаваль по каналу «витрата палива – зміст O_2 » складається з декількох аперіодичних ланок із запізненням виду:

$$W(s) = \frac{K}{(T(s) + 1)^n} e^{-\tau(s)},$$

зі значеннями, що змінюються протягом часу, в певному діапазоні (до 60 %), випадковим чином в залежності від навантаження агрегатів СЕУ.

4.2. Апробація адаптивної нечіткої САУ

База знань нечіткого адаптера (блоку адаптації чинного на базі мконтролера Motorola 68HC), реалізована в програмі MatLab (FLT) і представлена в табл. 4.1. У таблиці наступні позначення: М – мале; S – середнє; В – велике.

Вікно результатів роботи нечіткого адаптера при вхідних значеннях $A_1 = 1,6$ і $T_p = 100$ с, визначених ідентифікатором по перехідному процесу (див. на рис 4.4.), рекомендує настройки ПІ-регулятора САУ: $K_p = 1,58$, $T_i = 19,4$ (рис. 4.2).

Таблиця 4.1 - База знань нечіткого адаптеру

IF (A_1 is M) and (T_p is M) then (K_p is M)(T_i is M) (1)
IF (A_1 is M) and (T_p is B) then (K_p is S)(T_i is S) (1)
IF (A_1 is S) and (T_p is M) then (K_p is S)(T_i is S) (1)
IF (A_1 is B) and (T_p is B) then (K_p is B)(T_i is S) (1)
IF (A_1 is S) and (T_p is S) then (K_p is B)(T_i is B) (1)

При апробації рекомендованих ЕС налаштувань ПІ-регулятора (див. рис. 4.2 – 4.3.) отримані перехідні процеси на рис. 4.5. Як видно з рис. 4.5 процеси задовольняють необхідним показниками і процес 1 відрізняється поліпшеними характеристиками $A_1 = 1,1$, $T_p = 35$ в порівнянні з процесом на рис. 4.4 ($T_p = 120$ с). Використання методу на етапах налагодження нової або модернізованої судовий САУ об'єктів СПУ дозволяє скоротити час на визначення математичної моделі об'єкта і розрахунку оптимальних настроювальних параметрів типових регуляторів. Також метод дозволяє виключити помилки налагодження САУ за попереднім аналізом при налагодженні до 25 %

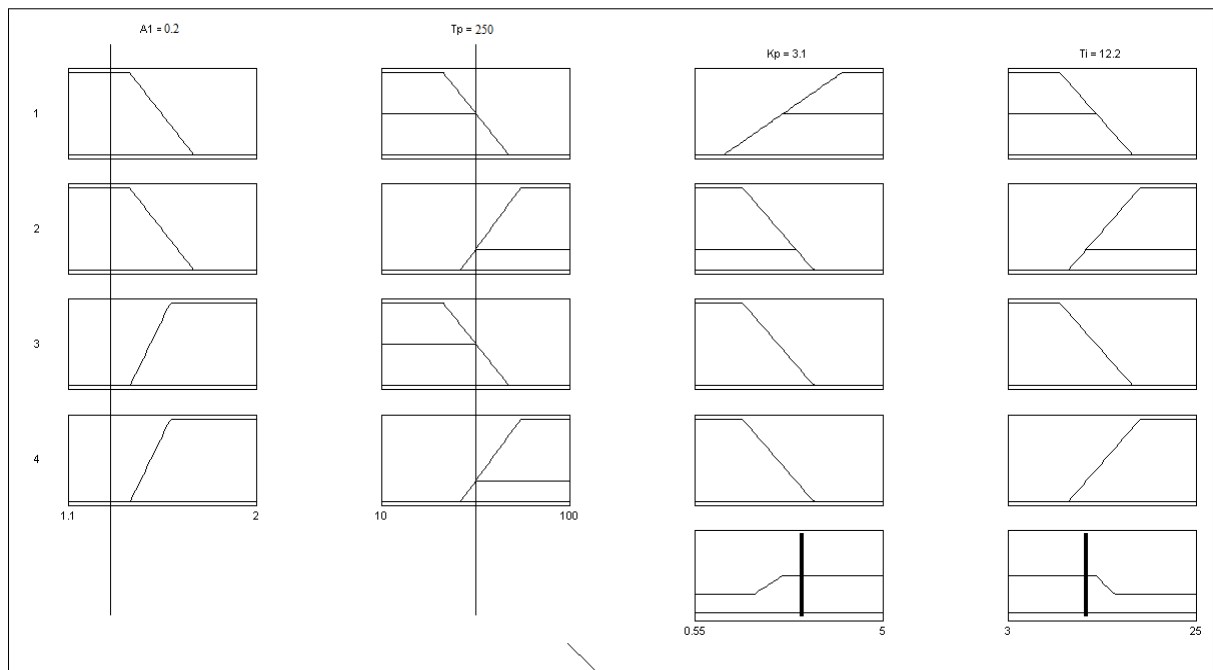
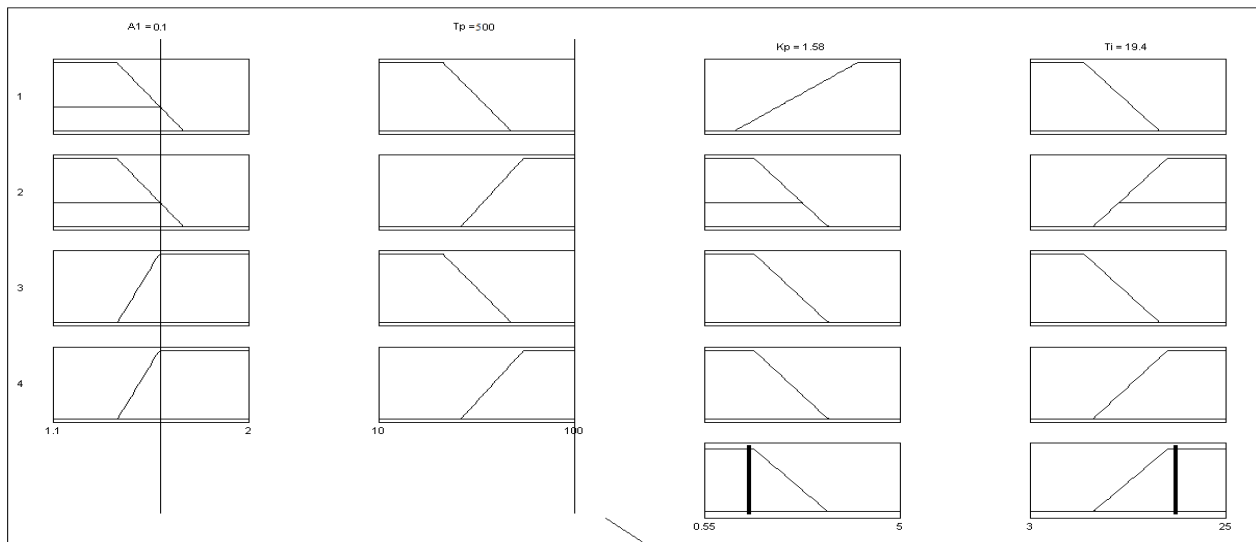


Рисунок 4.2. - Вікно результатів роботи нечіткого адаптера: 1 – задовільні; 2 – незадовільні показники якості (A , T_p)

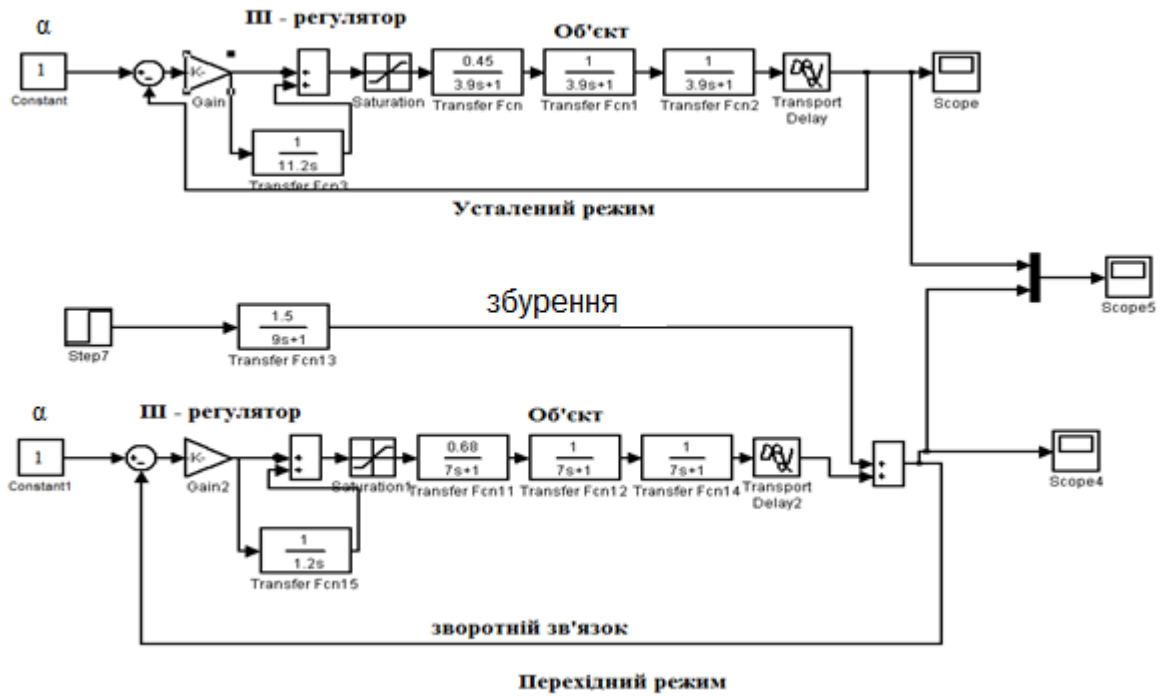


Рисунок 4.3 - Схеми моделювання САУ стабилизации α

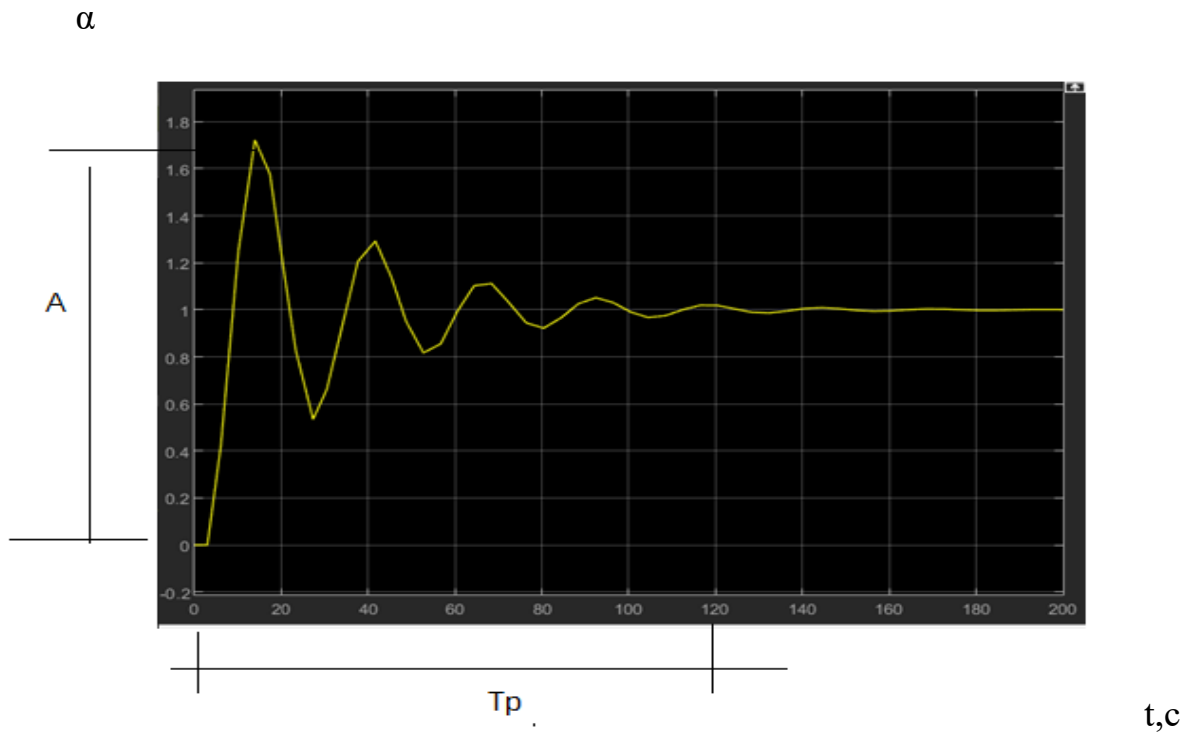


Рисунок 4.4. - Перехідний процес САУ підтримки α в СПК, працюючому в динамічному режимі без нечіткої адаптації

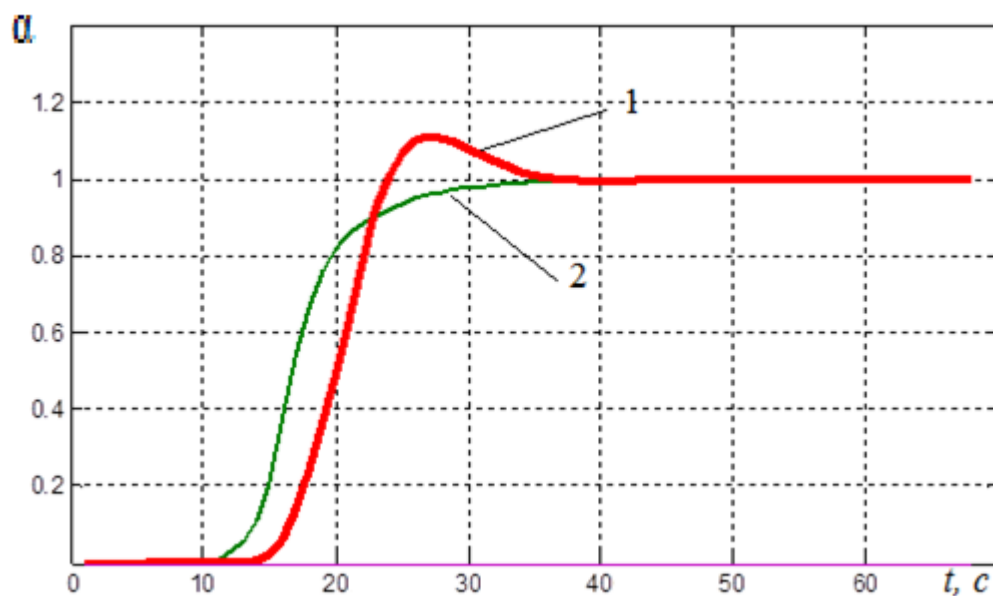


Рисунок 4.5. - Процеси адаптивного управління: 1 – адаптивна САУ підтримки α в СПК, працюючому в динамічному режимі з переходом на паропродуктивність 6 т/год і впливу каналу зовнішнього збурення; 2 – адаптивна САУ при роботі СПК з паропродуктивністю 4 т/год в сталому режимі

Висновки до розділу

Застосування адаптивних нечітких систем автоматичного управління (САУ) для стабілізації коефіцієнта надлишку повітря у процесі згоряння рідкого палива в парових котлах забезпечує підвищення ефективності та надійності роботи суднового котлоагрегату. На відміну від традиційних регуляторів, нечіткі САУ здатні самостійно адаптуватися до зміни характеристик палива, навантаження котла та зовнішніх умов експлуатації. Такі системи використовують базу знань, сформовану на основі експертних правил, і дозволяють приймати керуючі рішення навіть за умов невизначеності або неточності вхідних даних — наприклад, при коливаннях складу димових газів або зміні кольору факела. Завдяки цьому підтримується оптимальний коефіцієнт надлишку повітря, що гарантує повніше згоряння палива, зменшення втрат теплоти з димовими газами та скорочення викидів шкідливих речовин.

Висновки

Колір факела горілки є інформативним візуальним показником стану процесу згоряння рідкого палива в парових котлах і безпосередньо відображає ступінь повноти горіння та величину коефіцієнта надлишку повітря. Світло-блакитний або білуватий факел свідчить про оптимальні умови горіння, тоді як жовтий або червонуватий відтінок сигналізує про нестачу повітря, неповне згоряння та підвищені втрати теплоти. Таким чином, контроль кольору полум'я може слугувати швидким і надійним способом оцінки ефективності роботи котлоагрегату. Поєднання цього методу з адаптивними нечіткими системами автоматичного управління дозволяє підняти якість контролю на новий рівень. Нечіткі САУ здатні опрацьовувати неточні й неповні дані, включно зі змінами кольору факела, коливаннями вмісту кисню у димових газах та змінами навантаження котла. Адаптивність таких систем забезпечує автоматичне налаштування керуючих дій відповідно до фактичних умов горіння, що дозволяє стабілізувати коефіцієнт надлишку повітря та підтримувати оптимальний режим згоряння.

Інтеграція оптичного контролю кольору полум'я з інтелектуальними методами нечіткої логіки забезпечує:

- підвищення енергоефективності роботи котла;
- зменшення витрат палива;
- зниження шкідливих викидів;
- підвищення стабільності та надійності процесу горіння;
- оперативне формування рекомендацій для оператора або автоматичне коригування режимів.

Отже, комбіноване використання візуальних ознак факела й адаптивних нечітких систем керування є перспективним напрямом розвитку інтелектуальних технологій контролю й оптимізації процесів згоряння в сучасних парових котлах.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в наступному:

- розроблено математичну модель контуру САУ «витрата палива – зміст кісню у димових газах» в топки суднового парового котла Mitsubishi з базовою паровою продуктивністю 16 тонн пари на годину. Модель відображає експериментальні дані з високим ступенем адекватності.
- удосконалена інтелектуальна система контролю режимів горіння яка дозволяє вибрати оптимальний коефіцієнт надлишку повітря в САУ суднового допоміжного котла в залежності від кольору пламені горілки та характеру полум'я .

Практична цінність. Отримані результати можуть застосовуватися в САУ горіння палива в основних та допоміжних суднових парових котлів на морських і річкових судах.

В ході виконання роботи отримано:

- програмний продукт на мові пайтон якії дає оцінку ефективності процесу горіння рідкого палива в топки суднового парового котла в залежності від інформації оператора.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Marine Boiler and Steam Turbine Generator. URL: https://www.mhimme.com/auxiliary_boilers.html.
2. Бабак В.П., Запорожець О.О., Пономаренко О.В. Контроль процесу спалювання палива у котлоагрегатах малої та середньої потужності з використанням сенсорів кисню / В.П. Бабак, А.А. Запорожець, А.В. Пономаренко // Наукові звістки №1 (216)., 2023 - С. 130 -134.
3. Бадагуєв Б.Т. Суднові парові та водогрійні котли / Б.Т. Бадагуєв. - К.: Альфа-Прес, 2018. - 202 с.
4. Hu, Z. et al., Efficient model predictive control of boiler coal combustion (2024). ScienceDirect.
5. Nemitallah, M.A., Artificial intelligence for control and optimization of boilers' combustion (2023). ScienceDirect.
6. Lee, C.M., Combustion Control of Ship's Oil-Fired Boilers Based on Flame Image Prediction (2024). MDPI Journal of Marine Science and Engineering.
7. Liang, J., A Survey on Intelligent Optimization Approaches to Boiler Combustion (2023).
8. Wei, H., Research on Model Predictive Control of a 130 t/h Biomass Boiler (2023). MDPI Energies.
9. Михайленко В.С., Ложечников В.Ф. «Удосконалення системи рециркуляції димових газів суднового допоміжного котла» // *Автоматизація суднових технічних засобів: наук.-техн. зб.* Одеса, 2019. Вип. 25. С. 53-62. (
10. Михайленко В.С., Лещенко В.В., Сакали С.М., Харченко Р.Ю. «Нейромережева система моніторингу показників шкідливих викидів суднового парового котла» // *Автоматизація суднових технічних засобів: наук.-техн. зб.* Одеса, 2020. Вип. 26. С. 41-57. DOI:10.31653/1819-3293-2020-1-26-41-57.

11. Михайленко В.С., Щербінін В.А., Лещенко В.В., Харченко Р.Ю. «Моделювання процесу утворення шкідливих викидів у вихідних газах судових парових котлів» // Інформатика та математичні методи в моделюванні. 2020. Вип. 10. № 3-4. С. 154-166. DOI:10.15276/imms.v10.no3-4.
12. Михайленко В.С., Лещенко В.В. «Удосконалення системи управління процесом горіння палива в судових котлах» // *Автоматизація судових технічних засобів: наук.-техн. зб. Одеса, 2021. Вип. 27. С. 73-83. DOI:10.31653/1819-3293-2021-1-27-73-83.
13. Solberg. B. Control properties of bottom fired marine boilers. / B. Solberg, M. Karstensen, P. Andersen // In T. Gundersen, editor, ECOS 2015 Conference, volume 2, Trondhjem. – 2015 – Norway. – P. 669 – 678.
14. Mykhailenko V.S. Analysis of methods for adaptation of industrial control systems of thermal processes / V. S. Mykhailenko // Науковий вісник Національного гірничого університету. – 2014. – № 4. – С. 58 – 65. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nvngu_2014_4_11.
15. Методи синтезу систем управління судовими технічними засобами: методичні вказівки для виконання практичних робіт / Укл. В.С. Михайленко, І.М. Гвоздева. – Одеса: НУОМА, 2025 – 80 с.
16. Zadeh L. A. Fuzzy sets / L. A. Zadeh // Information and Control. – 1965, №8. – P. 338 – 353.
17. Леоненков А.Ю. Нечітке моделювання серед Matlab і fuzzyTech / А.Ю. Леоненків. - Харків.: БХВ, 2003. - 720 с.
18. Mamdani E. H. Application of fuzzy algorithms for control of simple dynamic plant / E. H. Mamdani // Proc. Inst. Elect. Eng. Contr. Sci., vol. 121, 1974. – P. 1585 – 1588.
19. Mamdani E. H. An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller / E. H. Mamdani, S. Assilian // Int. J. Man-Mach. Stud., vol. 7, 1975.
20. Sugeno M. On stability of fuzzy systems expressed by fuzzy rules with singleton consequents / M. Sugeno // IEEE Trans. Fuzzy Systems. – 1997. – № 7. – P. 201 – 224.

21. Takagi T. Fuzzy identification of system and its applications to modeling and control / T. Takagi, M. Sugeno // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, vol. 15, no. 1, 1985. – P. 166 – 132.
22. Solberg B. Hybrid model predictive control applied to switching control of burner load for a compact marine boiler design / B. Solberg, P. Andersen, J. M. Maciejowski, J. Stoustrup // In D. D. Cho, editor, 17th IFAC World Congress, 2024. – Seoul, Korea. – P. 10626 – 10633.
23. Михайленко В.С. Концепція розробки систем управління суднових парогенераторів: автореф дис. доктора тех. наук : 05.05.03/ Національний університет «ОМА». – Одеса, 2021 – 46 с.
24. .Shome Anabik, S. Denis Ashok. Fuzzy Logic Approach for Boiler Temperature & Water Level Control. // International Journal of Scientific & Engineering Research, Volume 3, Issue 6, June 2023. – P. 1 – 6.

ДОДАТКИ

Доаток А

Паливо для суднових парових котлів (сучасні марки та характеристики)

Основні категорії палива та їх властивості

Марка / категорія	Опис	Приблизна специфікація*
Залишкові палива (Residual Fuels) – наприклад, марки типу IFO 380 (або RMG380 за ISO 8217)	Тяжкі мазутоподібні палива з високою в'язкістю. Використовуються у головних котлах або енергетичних установках, розрахованих на таке паливо.	Густина до $\approx 991 \text{ кг/м}^3$ при 15°C , в'язкість до $\approx 380 \text{ мм}^2/\text{с}$ (cSt) при 50°C , температура спалаху не нижче 60°C , вміст сірки (у старих зразках) до 3.5 %, нині — $\leq 0.5 \%$.
IFO 380 з вмістом сірки $\leq 0.5 \%$ (VLSFO)	Сучасний варіант залишкового палива, що відповідає вимогам MARPOL Annex VI (глобальний ліміт 0.50 %).	Густина $\leq 991 \text{ кг/м}^3$, в'язкість $\leq 380 \text{ мм}^2/\text{с}$ при 50°C , температура спалаху $\geq 60^\circ\text{C}$, сірка $\leq 0.50 \%$.
Дистилятні палива (Distillate Marine Fuels) – MGO (Marine Gas Oil), MDO (Marine Diesel Oil)	«Легкі» палива з низькою в'язкістю. Використовуються для допоміжних котлів, генераторів, або в зонах з екологічними обмеженнями.	Наприклад, густина до $\approx 890 \text{ кг/м}^3$ при 15°C (DMA за ISO 8217), сірка $\leq 0.1 \%$ у зонах контролю викидів (ECA).
VLSFO / ULSFO (Very-Low / Ultra-Low Sulphur Fuel Oil)	Палива з пониженим вмістом сірки ($\leq 0.50 \%$ або $\leq 0.10 \%$), рекомендовані для нових екологічних норм.	Відповідають таблицям ISO 8217:2024, можуть містити біокомпоненти.

Рис. А - Марки палива для СПК

Додаток В

Характеристики СПГ МАС-35В

Навантаження		25%	50%	75%	100%
Парова продуктивність	kg/h	8,750	17,500	26,250	35,000
Тиск у барабані	kg/cm ²	16.0	16.0	16.0	16.0
Температура живлячої води	deg.C	80.0	80.0	80.0	80.0
Температура насиченого пару	deg.C	203.4	203.4	203.4	203.4
ККД (LHV BASE)	%	82.1	82.8	81.9	80.5
Теплова продуктивність	HHV	kcal/kg	10,280	10,280	10,280
	LHV	kcal/kg	9,713	9,713	9,713
Споживання мазута	kg/h	644	1,277	1,937	2,628
Надлишкове споживання повітря	%	31	16	15	15
Вміст O ₂	%	5.0	3.0	2.9	2.9
Споживання приточного повітря	kg/h	11,820	20,740	31,190	42,320
Споживання димових газів	kg/h	12,460	22,020	33,130	44,940
Температура навколишнього середовища	deg.C	45	45	45	45

Рис. В. - Робочі параметри ДПК Mitsubishi MAC – 35 В (режимна карта)

