

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ОДЕСЬКА МОРСЬКА
АКАДЕМІЯ»
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ АВТОМАТИКИ ТА
ЕЛЕКТРОМЕХАНІКИ

Кафедра: «Електрообладнання і автоматики суден»

ДИПЛОМНА РОБОТА МАГІСТРА

на тему:

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ В ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІЙ СИСТЕМІ
МОНІТОРИНГУ ПОКАЗНИКІВ НАДІЙНОСТІ СУДНОВОГО
ПАРОВОГО КОТЛА

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

Спеціальність:

271 – Морський та внутрішній водний транспорт

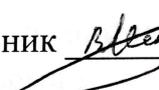
Спеціалізація: «Експлуатація суднового
електрообладнання і засобів автоматики»

АНІКАНОВ ВЛАДИСЛАВ СЕРГІЙОВИЧ

(підпис, прізвище та ініціали)

допущений до захисту  10.12.2025
(дата)

Завідуюча кафедрою  Ірина ГВОЗДЕВА
(підпис, прізвище та ініціали)

Керівник  Владислав МИХАЙЛЕНКО
(підпис, прізвище та ініціали)

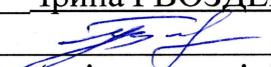
Нормоконтролер  В. Михайленко
(підпис, прізвище та ініціали)

Рецензент  В. Захарченко
(підпис, прізвище та ініціали)

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ОДЕСЬКА МОРСЬКА АКАДЕМІЯ»
Навчально-науковий інститут автоматики та електромеханіки
Спеціалізація: Експлуатація суднового електрообладнання і засобів
автоматики
Кафедра «Електрообладнання і автоматики суден»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедри Ірина ГВОЗДЕВА


(прізвище та ініціали)

« 10 » 12 2025 р.

ЗАВДАННЯ

на дипломну роботу магістра

АНИКАНОВ ВЛАДИСЛАВ СЕРГІЙОВИЧ

1. Тема: «Дослідження процесів в інтелектуальній системі моніторингу показників надійності суднового парового котла».

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

затверджена наказом ректора № 1502 від « 10 » 12 2025 року

2. Строк подання курсантом закінченої роботи 9.12.2025

3. Вихідні дані до роботи: судно балкер водотоннажністю 94002 тон; судновий допоміжний паровий котел котел GCS-22ST OSHIMA SHIPBUILDING CO., Ltd, парове виробництво 2.7 тон/год, тиск пари 0,54 МПа; суднова система моніторингу та автоматизації Terasaki WE-500

4. Зміст роботи магістра: аналіз умов експлуатації суднових парових котлів, розробка математичної моделі системи моніторингу та управління параметрами парового котла; імітаційне моделювання та дослідження ефективності інтелектуальної системи моніторингу.

5. Перелік ілюстрацій до презентації дипломної роботи магістра:

Презентація зі слайдами які відображають актуальність роботи, мету, наукову новизну та етапи розробки інтелектуальної системи моніторингу.

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'ЄКТА	Михайленко В.С., проф. каф ЕОіАС	7.05.25	15.09.25 <i>В.С.</i>
РОЗРОБКА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ ПАРАМЕТРІВ КОТЛА	Михайленко В.С., проф. каф ЕОіАС	16.09.2025	8.12 2025 <i>В.С.</i>

Дата видачі завдання: " 7 " 05 2025 року

Керівник *В.С.* проф. Владислав МИХАЙЛЕНКО

Завдання прийняв до виконання *В.С.* Владислав АНКАНОВ

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломної роботи магістра	Термін виконання етапів роботи	Примітка
	Аналіз наукової літератури	7.05 – 8.06	<i>вск</i>
	Розробка математичної моделі	8.06 – 10.10	<i>вск</i>
	Розробка нечіткої системи моніторингу	10.10 – 10.11	<i>вск</i>
	Моделювання запропонованої системи	10.11 – 10.12. 2025	<i>вскк</i>

Курсант-дипломник



(підпис)

Владислав АНІКАНОВ

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи



(підпис)

Владислав МИХАЙЛЕНКО

(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Дипломна робота магістра: 63 с., 12 рис., 9 табл.,
30 джерел,

Тема: «Дослідження процесів в інтелектуальній системі моніторингу
показників надійності суднового парового котла»

Актуальність теми. У сучасних умовах розвитку морського транспорту ключового значення набувають питання підвищення надійності, енергоефективності та безпеки роботи суднових енергетичних установок. Суднові парові котли, як складові енергетичного комплексу, забезпечують безперервне функціонування життєва важливих систем судна. Водночас традиційні методи контролю технічного стану часто не дозволяють своєчасно виявляти відхилення в роботі обладнання. Тому актуальною є розробка інтелектуальної системи моніторингу, що на основі аналізу даних у реальному часі може підвищити ефективність експлуатації котельних установок та запобігти аварійним ситуаціям.

Мета роботи. Метою магістерської роботи є дослідження процесів функціонування інтелектуальної системи моніторингу показників надійності суднового парового котла з метою підвищення його енергоефективності, зменшення ризику відмов та оптимізації режимів роботи.

Об'єкт дослідження. Процеси моніторингу технічного стану суднового парового котла під час експлуатації в умовах змінних навантажень.

Предмет дослідження. Методи інтелектуальної обробки інформації, математичні моделі та алгоритми, що забезпечують оцінювання надійності та ефективності роботи суднового парового котла.

Методи дослідження. У роботі застосовано методи системного аналізу, математичного моделювання, теорії надійності, машинного

навчання, методи нечіткої логіки, а також сучасні підходи до побудови сенсорних систем збору даних. Моделювання процесів проводилось із використанням програмного середовища MATLAB/Simulink.

Наукова новизна. Наукова новизна роботи полягає у розробленні удосконаленого підходу до моніторингу технічного стану суднового парового котла, який поєднує сенсорні технології та методи машинного навчання для прогнозування відмов. Уперше запропоновано модель інтелектуального аналізу параметрів котельної установки з можливістю самонавчання на основі історичних даних експлуатації.

Практичне значення одержаних результатів. Отримані результати можуть бути використані при створенні та впровадженні інтелектуальних систем моніторингу на морських судах для підвищення ефективності експлуатації енергетичних установок, зниження витрат палива та мінімізації ризику аварійних відмов. Розроблена методика також може бути адаптована для контролю стану інших видів енергетичного обладнання у промисловості та енергетиці.

Апробація результатів дипломної роботи. Результати роботи було розглянуто на науково-технічній конференції молодих вчених «Інновації та технології на морському та внутрішньому водному транспорті». НУ «ОМА» – 2025.

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА СИСТЕМА, МОНІТОРИНГ, СУДНОВИЙ ПАРОВИЙ КОТЕЛ, ДІАГНОСТИКА, НЕЧІТКА ЛОГІКА

ABSTRACT

Master's thesis: 63 p., 12 fig., 9 tab., 30 sources,

Topic: "Research of processes in the intelligent system for monitoring the reliability indicators of a ship's steam boiler"

Topic relevance. In modern conditions of maritime transport development, the issues of increasing the reliability, energy efficiency and safety of ship's power plants are of key importance. Ship's steam boilers, as components of the energy complex, ensure the continuous functioning of vital ship systems. At the same time, traditional methods of monitoring the technical condition often do not allow timely detection of deviations in the operation of equipment. Therefore, the development of an intelligent monitoring system is relevant, which, based on real-time data analysis, can increase the efficiency of boiler plant operation and prevent emergency situations.

Purpose of the work. The purpose of the master's thesis is to study the processes of functioning of an intelligent system for monitoring the reliability indicators of a ship's steam boiler in order to increase its energy efficiency, reduce the risk of failures and optimize operating modes.

Object of research. The object of research is the processes of monitoring the technical condition of a ship's steam boiler during operation under variable load conditions.

Subject of research. The subject of research is methods of intelligent information processing, mathematical models and algorithms that provide an assessment of the reliability and efficiency of the ship's steam boiler.

Research methods. The work uses methods of system analysis, mathematical modeling, reliability theory, machine learning, fuzzy logic methods, as well as modern approaches to building sensor data collection systems. Process modeling was carried out using the MATLAB/Simulink software environment.

Scientific novelty. The scientific novelty of the work lies in the development of an improved approach to monitoring the technical condition of a ship's steam boiler, which combines sensor technologies and machine learning methods for predicting failures. For the first time, a model of intelligent analysis of boiler plant parameters with the ability to self-learn based on historical operation data is proposed.

Practical significance of the results obtained. The results obtained can be used in the creation and implementation of intelligent monitoring systems on seagoing vessels to increase the efficiency of power plant operation, reduce fuel consumption and minimize the risk of emergency failures. The developed methodology can also be adapted to monitor the condition of other types of power equipment in industry and energy.

Approbation of the results of the thesis. The results of the work were considered at the scientific and technical conference of young scientists "Innovations and technologies in maritime and inland water transport". NU "OMA" - 2025.

INTELLECTUAL SYSTEM, MONITORING, SHIP STEAM BOILER,
DIAGNOSTICS, FUZZY LOGIC

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ.....	11
ВСТУП.....	12
1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	13
1.1 Огляд наукової літератури.....	13
1.2 Опис об'єкта та його конструктивних характеристик.....	16
1.3 Принцип роботи суднового парового котла.....	19
1.4 Моделі надійності технічних систем: аналіз методів прогнозування відмов та оцінки надійності.....	23
1.5 Сучасні сенсорні технології: принципи роботи сенсорів, що забезпечують збір даних про параметри роботи котла.....	25
1.7 Приклади існуючих методів діагностики судових парових котлів та їх недоліки.....	27
1.8 Переваги запропонованої інтелектуальної системи діагностики на основі нечіткого алгоритму Мамдані.....	28
2. РОЗРОБКА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ СИСТЕМИ ДІАГНОСТИКИ ПАРАМЕТРІВ НАДІЙНОСТІ ПАРОВОГО КОТЛА.....	30
2.1 Конструктивні особливості судна m/v BELMONTE та головної енергетичної установки.....	30
2.2 Загальна структура системи моніторингу СПК.....	31
2.3 Побудова нечіткої моделі.....	39
2.4 Реалізація системи експертної системи.....	34
3. МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ МОНІТОРИНГУ ПАРАМЕТРІВ НАДІЙНОСТІ ПАРОВОГО КОТЛА.....	35
3.1 Математичне моделювання процесів моніторингу показників надійності СПК.....	35
3.2 Комп'ютерне моделювання режимів роботи СПК.....	36
3.3 Оцінка точності прогнозування.....	38
4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	39
4.2 Збір даних з системи моніторингу СПК.....	39
4.5 Аналіз результатів роботи експертної системи.....	42
4.6 Система прогнозування виникнення аварії у судовому паровому котли.....	48
ВИСНОВКИ.....	54
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	55
ДОДАТКИ.....	58

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

ДАУ – Дистанційне автоматизоване управління

ДПК – Допоміжний паровий котел

НЛ – нечітка логіка

ММ – математична модель

ML – Машинне навчання (Machine Learning)

ПТЕ – Правила технічної експлуатації

ССМ – суднова система моніторингу

ВСТУП

У сучасних умовах розвитку світового судноплавства питання підвищення енергоефективності, надійності та безпеки роботи суднових енергетичних установок набувають особливого значення. Морський транспорт залишається одним із ключових елементів світової економіки, забезпечуючи понад 80 % міжнародних вантажоперевезень. Водночас зростання вартості енергоносіїв, посилення екологічних норм (зокрема вимог MARPOL Annex VI) та тенденції до цифровізації суднових систем стимулюють пошук нових підходів до управління технічним станом енергетичного обладнання [1].

Одним із найбільш складних і відповідальних елементів суднових енергетичних установок є парові котли, які забезпечують подачу пари до турбін, допоміжних механізмів та систем життєзабезпечення судна. Надійність їхньої роботи безпосередньо впливає на енергетичну ефективність, безпеку екіпажу та стабільність усього суднового комплексу. Традиційні методи контролю технічного стану котлів ґрунтуються на періодичних вимірюваннях і візуальних перевірках, що не завжди дозволяє своєчасно виявити приховані дефекти або тенденції до аварійних відмов.

У зв'язку з цим актуальним напрямом сучасних науково-технічних досліджень є розроблення інтелектуальних систем моніторингу, які здатні автоматично аналізувати параметри роботи суднового парового котла, прогнозувати його технічний стан та формувати рекомендації для екіпажу або автоматизованих систем керування. Такі системи базуються на принципах штучного інтелекту, машинного навчання, нечіткої логіки та математичного моделювання, що забезпечує новий рівень ефективності у підтриманні надійності суднового обладнання.

1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1. Огляд наукової літератури

Огляд побудовано на аналізі монографій, наукових статей, технічних рекомендацій суднових класифікаційних товариств та міжнародних стандартів, а також довідкових документів щодо інструментів (MATLAB, Fuzzy Logic Toolbox). Пріоритет віддавався джерелам українських та європейських авторів й організацій, а також класичним праці в галузі нечіткої логіки та машинного навчання. Ключові теми: фізика та режими роботи парових котлів, методи технічного діагностування, сенсорні системи збору даних, застосування нечіткої логіки і машинного навчання для виявлення аномалій, стандарти безпеки та експлуатації суднових котлів.

У численних працях на предмет суднових котлів описані основні фізичні процеси: теплообмін у топковій частині, пароутворення, поведінка парового барабана при зміні навантаження, вплив накипу та корозії на ефективність теплообміну [5,13, 15]. Праці українських дослідників [4] детально описують типові механізми зносу й дефектів у суднових котлах: накопичення відкладень, деградація теплообмінних поверхонь, знос насосів і клапанів, проблеми з якістю підживлювальної води. Ці роботи підкреслюють, що критичні фактори для надійності котла — це контроль рівня води, стабільність тиску пари й якість горіння (витрата палива, склад димових газів).

Критична оцінка: існуючі описові розробки дають повне уявлення про фізичні чинники, але традиційні методики діагностики часто є декларативними (регламентні перевірки, періодичні інспекції) і недостатньо ефективні для раннього виявлення процесів у реальному часі.

Традиційні методи включають порогову сигналізацію, періодичні вимірювання, ручний аналіз журнальних записів і використання PID-

регуляторів для підтримки режимів. Системи SCADA забезпечують збір і візуалізацію, але рідко мають інструменти прогнозування. Класифікаційні товариства (DNV, Lloyd's) [7, 8] і стандарти (EN, ISO) [6, 9] визначають вимоги до вимірювання і безпеки, але не деталізують інтелектуальні алгоритми діагностики.

На основі аналізу можна зробити наступну оцінку наукових робіт: порогові методи покликані реагувати на вже наявні відхилення; вони не здатні ефективно працювати при шумних, неповних і суперечливих даних, що часто зустрічається на борту судна. Крім того, ручний аналіз і реактивність приводять до пізніх рішень і підвищених затрат.

Сучасні сенсорні системи для котлів включають датчики температури (термопари, PT100), тиску (п'єзорезистивні трансд'ютори), витратоміри (ультразвукові, турбінні), рівня води (ємнісні, радіочастотні), газові аналізатори (O₂, CO₂, NO_x) та датчики вібрації. Підхід до розробки мережі вимірювань - розподілений збір з високою частотою і фільтрацією шуму, інтеграція через промислові протоколи (Modbus, Profibus). Українські роботи (Дьяків, Ніколенко) [20, 27] та технічні публікації висвітлюють проблеми корозії, захисту від морського середовища, калібрування і самодіагностики сенсорів.

На основі аналізу можна заключить, що наявність сучасної бази вимірів дає можливість збирати багатовимірні часові ряди - основу для інтелектуального аналізу; проте практичні проблеми - відмови сенсорів, дрейф вимірювань та корозійні ураження корпусу - вимагають реалізації алгоритмів фільтрації і перевірки достовірності даних.

Нечітка логіка (Zadeh, Ross) [11, 12] - природний підхід для розв'язання задач з нечіткою, неповною або експертною інформацією. Вона дозволяє формалізувати експертні правила у вигляді IF-THEN, працює з неточними входами і добре підходить для систем промислової діагностики. У літературі представлені численні приклади застосування Fuzzy Logic до оцінки стану котлів, насосів, теплообмінників - зокрема як доповнення або

заміна класичних порогових систем. MathWorks широко документує Fuzzy Logic Toolbox як інструмент для побудови FIS, візуалізації поверхонь рішень і інтеграції з Simulink. Аналіз робіт дозволяє виявити:

- сильні сторони використання апарату НЛ в системах моніторингу СПК, інтуїтивна інтерпретованість правил, гнучкість, стійкість до шуму.
- слабкі сторони: налаштування функцій належності та правил часто потребує експертних знань або навчання; чисто нечіткі системи можуть програвати у прогнозувальній точності складним ML-моделям на великих наборах даних.

У останнє десятиліття в технічній діагностиці активно використовують ML-підходи: регресії, дерева рішень, Random Forest, SVM, рекурентні нейромережі (LSTM) для обробки часових рядів, а також моделі виявлення аномалій (isolation forest, автоенкодер). Основна перевага ML - здатність вичавлювати закономірності з історичних даних і прогнозувати RUL (remaining useful life). У роботах Perner, Bishop, Ristic описані класифікатори й фільтри для трекінгу та виявлення аномалій. [10, 13, 21].

Можна зазначити, що апарат ML потребує значних обсягів маркованих даних, складно інтерпретується (особливо глибинні мережі), і може бути чутливим до дрейфів процесу. У морській практиці часто недостатньо історичних даних або вони містять мало реальних аварій — це ускладнює навчання.

Актуальний тренд - гібридні системи, що поєднують переваги нечіткої логіки (інтерпретованість, експертні правила) із силою ML (адаптація, прогнозування). Наприклад, нечітка система може формувати первинну інтерпретацію і генерувати ознаки для ML-моделі, або навпаки - ML може налаштовувати параметри функцій належності. У практичних проектах гібридні підходи показують кращу роботу при обмежених даних, зменшуючи хибні тривоги та підвищуючи точність прогнозу. Гібридні системи є найбільш перспективними для судових застосувань - поєднують

інтерпретованість і навчальну здатність, але вимагають ретельного дизайну, валідації та уніфікації інтерфейсів.

Нормативні документи визначають вимоги щодо конструкції, випробувань і безпеки котлів, а також до систем контролю й сигналізації. Вони виступають базою для технічних рішень і впровадження інтелектуальних систем, оскільки будь-які автоматичні дії (наприклад, аварійне зниження навантаження) повинні відповідати правилам безпеки. Публікації EMSA та ІМО акцентують увагу на енергоефективності й екологічних нормах, що також стимулює впровадження систем моніторингу для оптимізації спалювання палива і зниження викидів.

1.2 Опис об'єкта та його конструктивних характеристик

В якості об'єкта дослідження використовується – судновий паровий котел працюючий судне BELMONTE котел марки GCS-22ST OSHIMA SHIPBUILDING CO., Ltd з наступними параметрами:

- Design pressure: 0.69 MPa
- Working pressure Oil fired section: 0.54 MPa
- Exhaust gas section: 0.54 MPa
- Safety valve set pressure: 0.69 MPa
- Hydraulic test pressure: 1.035 MPa
- Feed water temperature: 60 -c
- Steam temperature: Saturated steam
- Evaporation
 - Oil fired section: 1700 kg/h
 - Exhaust gas section: 8980 kg/h
 - Do. (MCR) 1280): kKg/h
- Heating surface
 - Oil fired section: 28.7 m
 - Exhaust gas section: 205.8 mTM

- Fuel consumption: 130.8 kg/h
- Fuel oil: "C" oil (380 cSt at 50 °C) , MGO
- Low calorific value 40820 kJ/kg
- Boiler efficiency: 80.0%
- Furnace volume: 2.93 m³
- Steam space volume: 2.35 m³
- Water volume (normal! level): 7.44 m³
- Main engine load: 100(MCR) 90(NOR) %
- Exhaust gas quantity: 85700 79700 kg/h
- Exhaust gas temperature: 229 217 °C
- Allowable draft loss: 1.74 kP, 177 mmAq
- Dry weight (excluding burner): 20000 kg
- Insulation cover color: Heat resist. Silver

Таблиця 1.1. – Матеріали з яких зроблен судовий паровий котел

Base material	Material used	Tensile strength	Equivalent	
			NK Grade	JIS st'd
Boiler plate	Q245R GB713	400-520 N/mm ² (3<t=60)	* KP42	* SB410
Boiler tube	20 GB3087	410-550 N/mm ²	*KSTB412	* STB410
Flange & socket	Q245R GB713 * 20 GB3087	400-520 N/mm ² (3<t=60Q) 410-550 N/mm ²	*KP42 *KSTB42	* SB410 * STB410
Plate (Attached to pressure parts)	Q245R GB713	400-520 N/mm ² (3<t=60)	*KP42	* SB410
Plate (Non pressure parts)	Q235-A GB700	410-510 N/mm ²	-----	SS400

Фотографія СПК показана на рис. 1.1.



Рисунок. 1.1. - Котел GCS-22ST OSHIMA SHIPBUILDING на судне
BELMONTE

Сучасні суднові парові котли працюють у складних умовах експлуатації, де на їх надійність впливають численні змінні фактори: температура та тиск пари, рівень води в барабані, інтенсивність подачі живильної води, якість

палива, стан нагрівальних поверхонь, наявність відкладень та інші. Більшість із цих параметрів змінюються у реальному часі і мають нелінійні взаємозв'язки, що ускладнює їх аналіз методами класичної математики.

Традиційні методи діагностики (пороговий контроль, регресійні моделі) мають низьку ефективність при неповній, шумовій або суперечливій інформації. У свою чергу, метод нечіткої логіки (Fuzzy Logic) дозволяє враховувати нечіткість вимірювань і досвід експертів, переводячи якісні знання у формальний математичний апарат.

Тому, для реалізації задачі діагностики параметрів надійності парового котла обрано побудову інтелектуальної системи на основі нечіткого висновку, реалізованої у середовищі MATLAB Fuzzy Logic Toolbox.

1.3 Принцип роботи суднового парового котла

Паровий котел на судні призначений для перетворення теплової енергії палива в теплоту пари заданих параметрів (тиск, температура, витрата), необхідної для приводу турбін, приводу допоміжних машин, опалення та технологічних потреб судна. За конструкцією котли класифікуються на водотрубні (water-tube) і пальникові / барабанні (shell-type), причому для морських застосувань переважно використовують водотрубні котли через їхню кращу реакцію на навантаження, безпеку та можливість більш високих тисків.

Основні елементи суднового водотрубного парового котла (рис.1.2) які впливають на надійність роботи :

- Палильна камера (furnace) - простір, де згорає паливо; забезпечує інтенсивну конвективну і радіаційну передачу тепла на поверхні нагріву.
- Трубні гирла та водяні колектори (steam drum, mud drum, downcomers) - барабан пари (steam drum) накопичує пар/воду і

- забезпечує розділення пари від водяної фази; mud drum - збірник шламу/осадів; downcomers - напрямні труби для циркуляції води.
- Труби нагріву (waterwalls, risers, generating tubes) - формують контур циркуляції води- пари; по них відбувається основна теплопередача.
 - Економайзер (economizer) - рекуперативний нагрівач живильної води в котельному циклі, що підвищує ККД.
 - Перегрівач (superheater) - підвищує температуру насиченої пари вище точки насичення для живлення турбін.
 - Повітропідігрівач (air preheater) - підвищує температуру повітря, що подається в паливник, підвищуючи ефективність горіння.
 - Паливна й повітряна система (burners, forced draught) - забезпечують подачу палива та повітря, регулювання співвідношення «повітря/паливо» (λ).
 - Система підживлення (feedwater pump), система розвантаження шламу (blowdown) - керують подачею води та її хімічною обробкою.
 - Безпечові пристрої (safety valves, level indicators, pressure gauges) - забезпечують захист від надлишкового тиску та контроль рівня води.

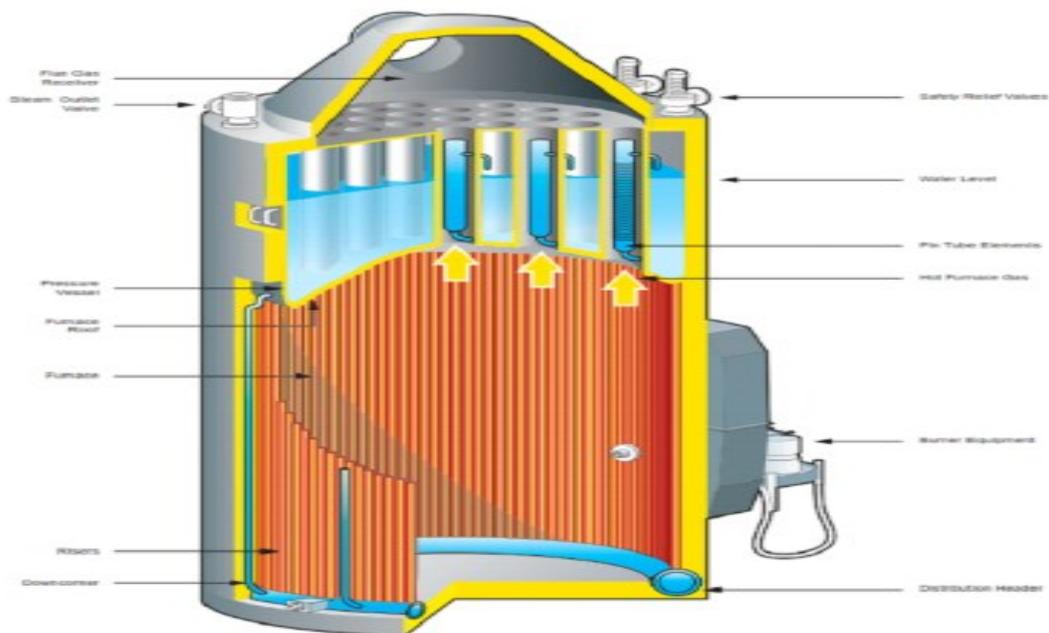


Рисунок 1.2. – Схема СПК

Аналіз фізичних процесів які протікають в СПК:

– Енергетичний баланс (тепловий баланс)

За сталого режиму описано формулою (1.1) :

$$Q_{fuel} * \eta_{comb} = m_{steam} * (h_{out} - h_{in}) + Q_{loss} \quad (1.1)$$

де: Q_{fuel} - теплота, що підводиться паливом;

η_{comb} - ефективність згоряння;

m_{steam} - масовий витік пари;

h_{out} / h_{in} - ентальпії пари на виході та води на вході;

Q_{loss} - втрати тепла (вихлопні гази, випромінювання, кондукція).

Загальна теплопередача від факельної зони до води включає три послідовні опори: радіація від полум'я до стінки, кондукція через товщу металу, та конвекція від зовнішньої поверхні стінки до води/пари.

Ефективність змінюється при накипі:

$$q = \frac{\Delta T}{R_{total}} = \frac{\Delta T}{\frac{1}{\alpha_g} + \frac{\delta}{\lambda_{metal}} + R_{fouling} + \frac{1}{\alpha_w}} \quad (1.2)$$

де α_g, α_w - коефіцієнти теплообміну на газовій та водянній сторонах;

δ - товщина металу;

λ_{metal} - теплопровідність металу;

$R_{fouling}$ - опір, що виникає при накипі.

Основні параметри контролю роботи СПК оператор бачить на мнемосхемі системі моніторингу (рис.1.3)

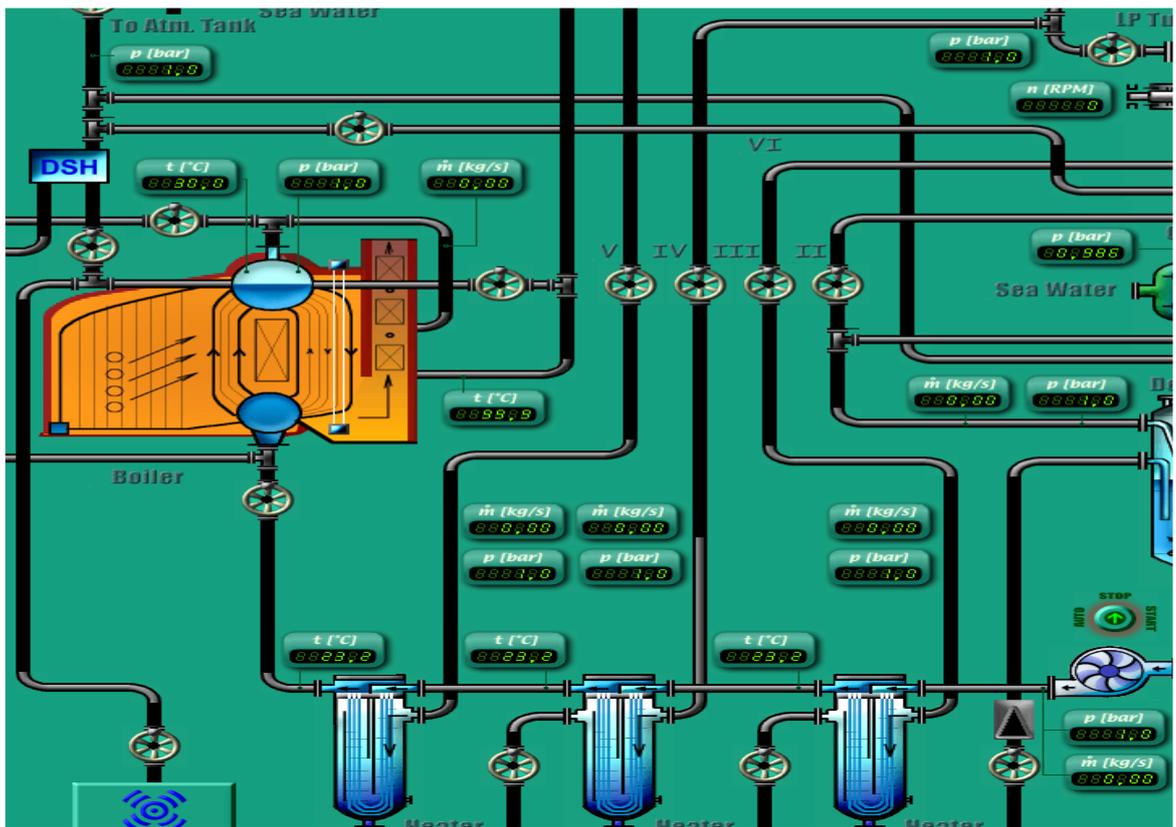


Рисунок 1.3 - Мнемосхема процесу управління паровим котлом

Для задач моніторингу (рис.1.3) та оцінки надійності роботи обладнання СПК використовують такі показники [12]:

- ККД котла (efficiency) — відношення корисної теплової потужності до теплоти палива.
- Витрата палива при одиничному виробництві пари (g/kWh або kg/t steam).
- Температурні перепади та нестабільність тиску пари.
- Частота аварійних режимів та час простою.
- Параметри корозійного та накипного стану, оцінювані через індикатори опору теплопередачі або тестування хімскладу води.
- MTBF / MTTR — середній час між відмовами та середній час відновлення.

Особливості суднової експлуатації, що впливають на роботу котла:

- Перемінність навантаження (маневри, зміни ходу) — призводить до частих перехідних режимів.
- Якість та склад палива — широкий діапазон фракцій і домішок.
- Корозія внаслідок морського середовища (солоність повітря, вологість).
- Обмежені умови технічного обслуговування на борту — рідше планові профілактики, обмежений набір запасних частин.
- Вібрації та динамічні навантаження — вплив на кріплення, зварні шви, датчики.

1.4 Моделі надійності технічних систем: аналіз методів прогнозування відмов та оцінки надійності

Цей підрозділ охоплює теоретичні підходи, що використовуються для кількісної оцінки надійності, методи прогнозування відмов (prognostics) і практичні інструменти діагностики (diagnostics) для складних технічних систем, таких як судновий паровий котел.

Базові поняття та ключові показники надійності:

- Надійність $R(t)$ - ймовірність безвідмовної роботи системи на інтервалі часу $[0, t]$.
- Функція відмов (фатальність) $F(t) = 1 - R(t)$
- Щільність інтенсивності ймовірності відмов $f(t) = \frac{dF(t)}{dt}$.
- Інтенсивність відмов (hazard rate) $\lambda = \frac{f(t)}{R(t)}$ - миттєва ймовірність відмови за умов безвідмовної роботи до часу t .
- MTBF (Mean Time Between Failures) - середній час між відмовами для ремонтоздатної системи.
- RUL (Remaining Useful Life) - очікуваний ресурс до відмови (критичний індикатор у прогнозуванні).

Найпростіша модель з постійною інтенсивністю $\lambda(t) = \lambda_0$;

$$R(t) = e^{-\lambda_0 t}; MTBF = \frac{1}{\lambda_0}, \quad (1.3)$$

Гнучка модель із формальним параметром форми k та масштабу λ :

$$R(t) = \exp\left(-\left(\frac{t}{\lambda}\right)^k\right); \lambda(t) = \frac{k}{\lambda}\left(\frac{t}{\lambda}\right)^{k-1}, \quad (1.4)$$

Якщо $k < 1$ - інтенсивність знижується (початкові дефекти), $k = 1$ - експоненціальна, $k > 1$ - інтенсивність зростає (втома/старіння). Вейбулл - стандарт для аналізу відмов обладнання (включаючи котельні трубопроводи, зварні з'єднання).

Типові критерії оцінювання надійності для суднових котельних установок:

1. Оцінка інтенсивності відмов по історії подій
На основі реєстру відмов та часу роботи застосовують оцінювачі максимуму правдоподібності (MLE) для параметрів розподілів (Weibull, експоненціальний).
2. Побудова RBD і FTA для критичних вузлів
Визначають найвразливіші компоненти (трубопроводи, зварні шви, пальники, нагрівальні поверхні) і застосовують аналіз чутливості.
3. Прогнозування RUL на основі деградаційних параметрів
Деградаційні відліки (наприклад, коефіцієнт теплопередачі, температура металу при заданому навантаженні) моделюються як стохастичні процеси:

$$X(t) = X_0 + \mu t + \sigma W(t), \quad (1.5)$$

де $W(t)$ - броунівський процес; за визначеними порогами визначають час виходу за допустимі межі \rightarrow RUL.

1.5 Сучасні сенсорні технології: принципи роботи сенсорів, що забезпечують збір даних про параметри роботи котла

Основою будь-якої інтелектуальної системи моніторингу є сенсорна мережа, яка виконує функцію збору первинних даних про стан об'єкта. Для суднових парових котлів це надзвичайно важливо, оскільки параметри технологічного процесу змінюються динамічно, а робота котла відбувається в умовах високої температури, тиску, вологості та вібрацій. Сучасні сенсорні технології дають змогу створювати розподілені системи вимірювання, які у реальному часі збирають інформацію з десятків або навіть сотень точок контролю. Основними групами сенсорів, що застосовуються в системах моніторингу суднових парових котлів, є:

1. Температурні сенсори - термопари, терморезистори (Pt100) та інфрачервоні датчики. Вони забезпечують точний контроль температури пари, води, димових газів та поверхонь нагріву. Для підвищення надійності використовуються термопари з ізольованими гарячими спаями або у вибухозахищеному виконанні.
2. Датчики тиску - п'єзорезистивні сенсори (Ariston Genus Type 784), здатні вимірювати тиск у паровому барабані, у контурі живлення та в системі конденсату. Сигнали з них використовуються для контролю безпеки (спрацьовування запобіжних клапанів) та для побудови динамічних моделей котла.
3. Витратоміри - електромагнітні прилади, що фіксують витрату палива, повітря, пари та води (ZHONG ZJ-LCD-M). Ці дані є основою для

обчислення ККД котельної установки та контролю економічних показників.

4. Сенсори складу газів - аналізатори кисню, вуглекислого газу, оксидів азоту (TGS3870-B04). Вони дозволяють регулювати процес горіння, запобігаючи надлишковому споживанню палива й перевищенню рівня токсичних викидів.
5. Датчики вібрації та акустичні сенсори - використовуються для виявлення механічних дефектів (розбалансування, тріщини, підшипникові зноси). Ці сенсори (XP600 & RMV-H0539) часто інтегруються з алгоритмами машинного навчання для діагностики стану обертових агрегатів (насосів, вентиляторів, компресорів).

Усі сенсорні дані передаються через промислові протоколи зв'язку (Modbus, CAN, Profibus, EtherCAT) до центрального контролера або безпосередньо до інтелектуальної системи обробки даних. На етапі збору відбувається фільтрація шумів, калібрування сигналів, перевірка достовірності, а потім — передача до алгоритмів аналізу. Важливим аспектом є стійкість сенсорної мережі до агресивного морського середовища. Корозія, конденсат, сольові відкладення, а також вібрації корпусу судна вимагають використання захищених корпусів із нержавіючої сталі, ізоляції контактів та вбудованих функцій самодіагностики. Сучасні сенсорні технології також дозволяють інтегрувати бездротові модулі (на основі Wi-Fi, ZigBee, LoRa), що зменшує складність монтажу та дає змогу створювати гнучкі розподілені системи контролю. У поєднанні з машинним навчанням така сенсорна мережа перетворюється на «цифровий двійник» котла, який у реальному часі відображає стан усіх його компонентів і прогнозує поведінку системи при зміні експлуатаційних режимів.

Таким чином, сучасні сенсорні технології є фундаментом для побудови інтелектуальних систем моніторингу, забезпечуючи високу точність, надійність та швидкість отримання даних.

1.6 Приклади існуючих методів діагностики суднових парових котлів та їх недоліки

1. Регламентні роботи за календарним планом - обслуговування проводиться через певні фіксовані інтервали часу відповідно до технічного регламенту судноплавної компанії або вимог класифікаційного товариства.

Недоліки:

- Регламент не враховує реальний стан обладнання.
- Вузол може вийти з ладу *між* інтервалами перевірок.
- Неєфективно з точки зору витрат: іноді деталі міняють, хоча вони ще працездатні.

2. Візуальний огляд та контроль оператором

Вахтовий механік здійснює періодичні огляди котла, контролює показники тиску, температури, рівня води, шуми, вібрації, роботу насосів та вентилів.

Недоліки:

- Людський фактор: механік може пропустити початкові ознаки дефекту.
- Немає можливості кількісно оцінити ступінь ризику.
- Система не здатна передбачити аварію, вона лише реагує на вже критичні стани.

3. Простий пороговий контроль датчиків

На котлах використовуються стандартні датчики рівня, тиску, температури, що лише фіксують факт перетину допустимих меж — і запускають аварійну сигналізацію.

Недоліки:

- Датчики реагують тільки після того, як параметр уже перейшов межу.
- Немає прогнозування розвитку аварійної ситуації.
- Фальшиві спрацювання при короткострокових коливаннях параметрів.

4. Відсутність інтегрованої моделі стану котла

Сучасні (традиційні) системи не аналізують:

- зміну витрати пари у часі,
- зміну витрати живильної води,
- тренди температури та тиску,
- взаємозв'язок між параметрами.

Тобто немає можливості оцінити реальний ризик аварійного зниження рівня води у барабані.

1.7 Переваги запропонованої інтелектуальної системи діагностики на основі нечіткої логіки Мамдані

На основі аналізу публікацій можна зазначити наступні переваги нечітких систем для моніторингу параметрів надійності СПК:

1. Прогнозування, а не лише фіксація аварії

Алгоритм Мамдані аналізує динаміку параметрів, а не окремі значення.

Приклад: різке зростання витрати пари та/або падіння витрати живильної води - система прогнозує ймовірність аварійного падіння рівня заздалегідь.

Тобто вона виявляє причину, а не наслідок.

2. Робота за принципом експертного інженера

У правилах моделі закладена логіка досвідченого механіка:

“Якщо витрата пари висока і витрата води падає - рівень скоро впаде.”

Таку логіку традиційними пороговими датчиками реалізувати неможливо.

3. Нечітка логіка адекватно працює з «неідеальними» даними

У котла параметри постійно коливаються. Нечітка логіка дозволяє:

- інтерпретувати нечіткі значення (наприклад, “витрата трохи збільшилась”),

- приймати рішення у ситуаціях, коли немає чіткої межі «норма/аварія».

4. Інтегральна оцінка ризику

Інтелектуальна система формує єдиний індикатор ризику, який залежить від багатьох параметрів. Традиційні системи не здатні створити зведений показник.

5. Зменшення навантаження на екіпаж

Система сама аналізує:

- тренди зміни параметрів;
- взаємозалежності;
- ризики;
- попереджувальні ситуації.

Оператор отримує не просто дані датчика, а готове рішення.

6. Підвищення економічної ефективності

Завдяки прогнозуванню:

- зменшується кількість аварійних зупинок,
- знижується перевитрата палива,
- зменшується знос обладнання,
- оптимізується робота насосів та клапанів.

7. Сумісність зі старими котлами

Система може працювати з типовими датчиками та навіть з застарілим обладнанням (Panamax, Oshima, Mitsubishi та ін.). Тобто її можна встановити без модернізації котла

2. РОЗРОБКА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ СИСТЕМИ ДІАГНОСТИКИ ПАРАМЕТРІВ НАДІЙНОСТІ ПАРОВОГО КОТЛА

2.1 Конструктивні особливості судна m/v BELMONTE та його головної енергетичної установки

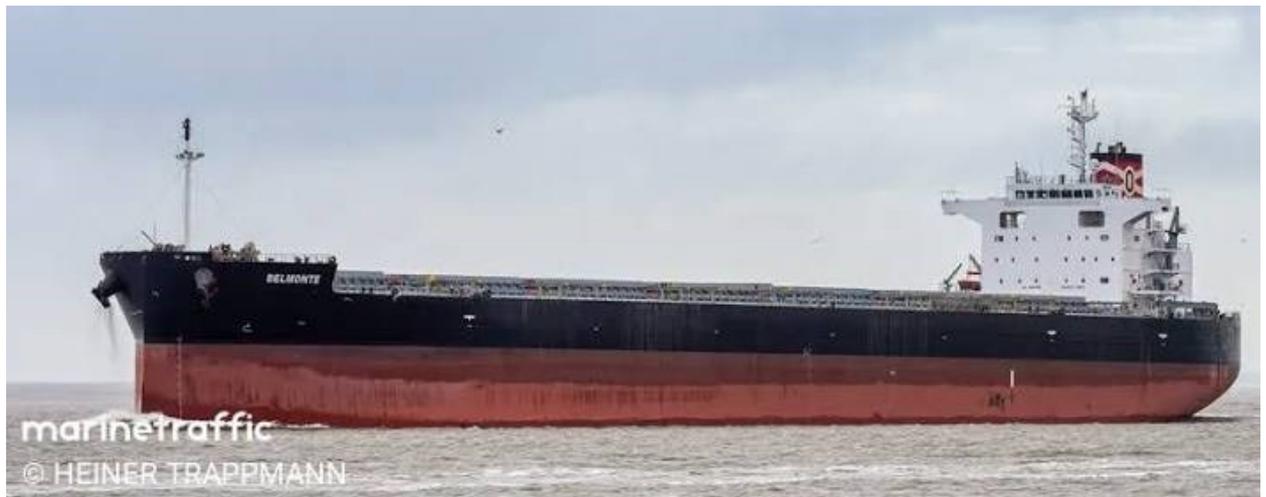


Рисунок 2.1 – Балкер m/v BELMONTE

Основні характеристики судна дів в табл.2.1.

Таблиця 2.1 - Загальна характеристика судна

ІМО №	9687124
Позивний	5LAZ9
Довжина, м	225
Ширина, м	32
Висота борту, м	20
Дедвейт, т	81281
Експлуатаційна швидкість, (вузли)	15,5

Таблиця 2.2 – параметри ГД (головного двигуна)

Виробник	MAN B&W
Число головних двигунів	1
Рік побудови	22.03.2014
Потужність, кВт	9378
Діаметр циліндру, мм	600
Хід поршня, м	2,4
Частота оберта, об/хв	88

2.2 Загальна структура інтелектуальної системи моніторингу параметрів СПК

Оснoву системи моніторингу СПК Data chief (рис.2.2.) складають блоки двох типів: *OCP 8800* – клавіатура та одночасно пульт управління; *SAU 8800* – блок збору та обробки інформації. Ці блоки виконані у формі мікроЕОМ. Кожен блок *SAU* по суті є ПЛК, що контролює 32 параметри та здатної функціонувати як у складі системи, так і автономна. Число таких блоків, що включаються до системи, визначається кількістю контрольованих параметрів і може досягати 10. Зв'язок блоків *SAU* з панеллю управління *OCP 8800* здійснюється за стандартним інтерфейсом CL ("струмова петля"). Прийом та обробка сигналів від датчиків параметрів, зіставлення їх із уставками, формування тимчасових затримок, тобто. основний обсяг функцій СЦК виконується безпосередньо у блоках *SAU*.

Блок *OCP*, розташований у центральному посту управління (ЦПУ) енергетичної установки, забезпечує виведення інформації оператору та дистанційне керування блоками *SAU*. Результати контролю відображаються на моніторі, реєструються принтером. Блок *OCP* забезпечує формування тривожних світлового та звукового сигналів у машинному відділенні, а також узагальнені тривожні сигнали, що надходять на ходовий місток судна та блоки узагальненої сигналізації БОС, розташовані в каютах механіків та в інших суднових приміщеннях.

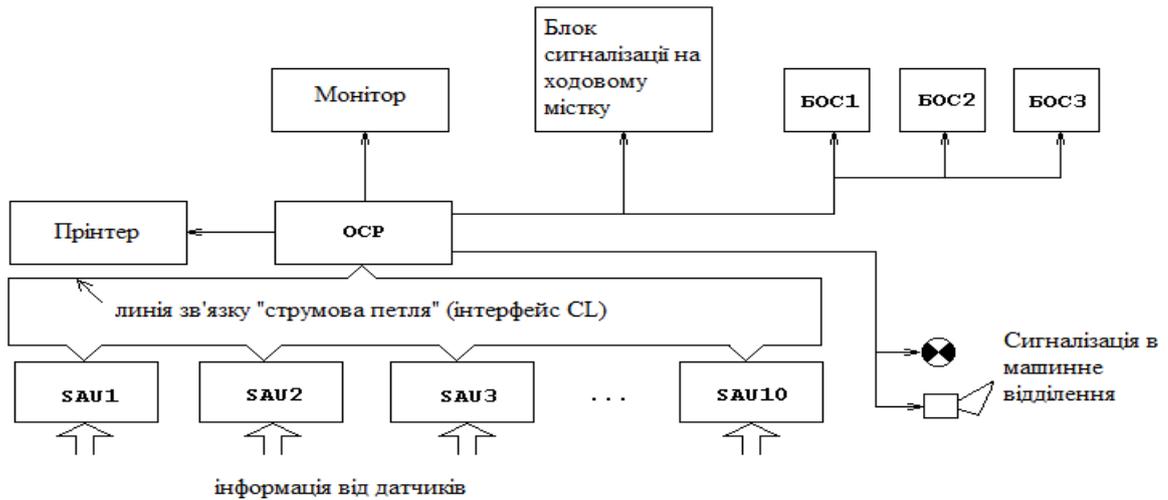


Рисунок 2.2. - Структурна схема локального контролю параметрів СПК
"Datachief 7 midi"

Основні модулі ССМ зазначені в табл. 2.5 - 2.6.

Таблиця 2.5 – Функціональні модулі, з яких складається інтелектуальна система

Модуль	Опис функцій
Підсистема збору даних	Приймає показники датчиків котла та інформацію з журналу експлуатації
Преобробка сигналів	Фільтрація шуму, нормування, усунення пропусків даних
Нечіткий блок оцінювання	Побудова моделей входів, формування нечітких правил, розрахунок рівня надійності
Модуль прийняття рішень	Визначає стан котла (нормальний, попереджувальний, аварійний)
Інтерфейс оператора	Візуалізація та рекомендації

Таблиця 2.6 - Ключові діагностичні параметри обрані для діагностики

Позначення	Параметр	Одиниці	Примітка
Tr	Температура перегрітої пари	°C	Впливає на термічну стійкість
Pk	Тиск у паровому барабані	МПа	Критичний показник безпеки
Lw	Рівень живильної води	% від номіналу	Відхилення веде до аварій
Qf	Інтенсивність спалювання палива	%	Пов'язана з навантаженням котла

2.3 Побудова нечіткої моделі діагностики параметрів СПК

Для моделі застосовано систему нечіткого висновку І. Мамдані, яка забезпечує [17]:

- зрозумілі інтерпретовані правила,
- природне представлення експертних знань,
- можливість візуалізації поверхонь рішень.

Основні типи функції належності в ССМ представлені в табл. 2.7

Таблиця 2.7 – Типи функції належності

Параметр	Терми	Тип функцій належності
Tr	Низька, Нормальна, Висока	Трикутні (trimf)
Pk	Нормальний, Підвищений, Аварійний	Трапецієвидні (trapmf)
Lw	Низький, Оптимальний, Перелив	Гаусові (gaussmf)
Qf	Мале, Середнє, Високе	Трикутні (trimf)

Приклад фрагмента бази правил:

1. **IF** Тиск нормальний **AND** Рівень води оптимальний **AND** Температура нормальна **THEN** Надійність висока.
2. **IF** Тиск підвищений **OR** Рівень води низький **THEN** Надійність задовільна.

3. **IF** Тиск аварійний **AND** Рівень води низький **THEN** Надійність низька.

У MATLAB правила задаються через редактор FIS або програмно:

```
fis = mamfis('Name','BoilerReliability');
fis = addRule(fis, [1 2 1 3 1 1]); % приклад правила
```

2.4 Реалізація експертної системи у пакети MATLAB

Програмний код експертної системи для допомоги оператору СПК представлено нижче :

Код програми

% Створення системи

```
fis = mamfis('Name','BoilerFuzzySystem');
```

% Додавання вхідних та вихідних змінних

```
fis = addInput(fis,[0 600],'Name','SteamTemp');
```

```
fis = addInput(fis,[0 1.5],'Name','DrumPressure');
```

```
fis = addInput(fis,[0 100],'Name','WaterLevel');
```

```
fis = addOutput(fis,[0 1],'Name','Reliability');
```

% Додавання функцій належності (приклад)

```
fis = addMF(fis,'SteamTemp','trimf',[200 300 400],'Name','Normal');
```

```
fis = addMF(fis,'Reliability','trimf',[0.7 1 1],'Name','High');
```

% Розрахунок

```
output = evalfis(fis,[320 0.9 70]);
```

Для оператора створюється:

- Графічна панель (GUI).
- Онлайн-відображення параметрів (трендів).
- Попередження про ризики перевантаження.
- Рекомендації з регулювання роботи СПК.

Таким, чином ЕС допомагає оператору СПК для забезпечення контролю та підвищення надійності роботи обладнання СПК.

РОЗДІЛ 3. МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ МОНІТОРИНГУ ПАРАМЕТРІВ НАДІЙНОСТІ ПАРОВОГО КОТЛА

3.1 Математичне моделювання процесу моніторингу показників надійності СПК

Мета математичного моделювання полягає у відтворенні динаміки роботи парового котла та визначенні взаємозв'язку між його експлуатаційними параметрами та рівнем надійності. Паровий котел може бути описаний як динамічна багатовхідна система, що має теплову, гідравлічну та термодинамічну складові. Для опису поведінки котла використовується система диференціальних рівнянь:

$$C \frac{dT_p}{dt} = Q_f - Q_{ET}, \quad (3.1)$$

де: C – теплоємність системи; T_p – температура перегрітої пари; Q_f – кількість тепла, що надходить у результаті спалювання палива; Q_{ET} – втрати тепла (теплопровідність корпусу, відведення пари).

Стан рівня води описується рівнянням масового балансу:

$$\frac{dL_w}{dt} = Q_{\text{подачі}} - Q_{\text{випарювання}}, \quad (3.2)$$

де: $Q_{\text{подачі}}$ – витрата води; $Q_{\text{випарювання}}$ – витрата пари, пропорційна навантаженню.

Тиск у барабані:

$$P_k = f(T_p, L_w, Q_f), \quad (3.3)$$

Тобто тиск залежить від температури, об'єму води та інтенсивності горіння.

Окрім фізичних залежностей, для оцінки надійності вводиться показник:

$$R_k = g(T_p, P_k, L_w, Q_f), \quad (3.4)$$

який визначається за допомогою нечіткої моделі, описаної у попередньому розділі.

Таким чином, система моніторингу працює у двох вимірах:

- 1) Фізичне моделювання стану котла.
- 2) Інтелектуальне оцінювання надійності на основі нечіткої логіки.

Також, система моніторингу визначає перехідні характеристики параметрів СПК (рис.3.1)

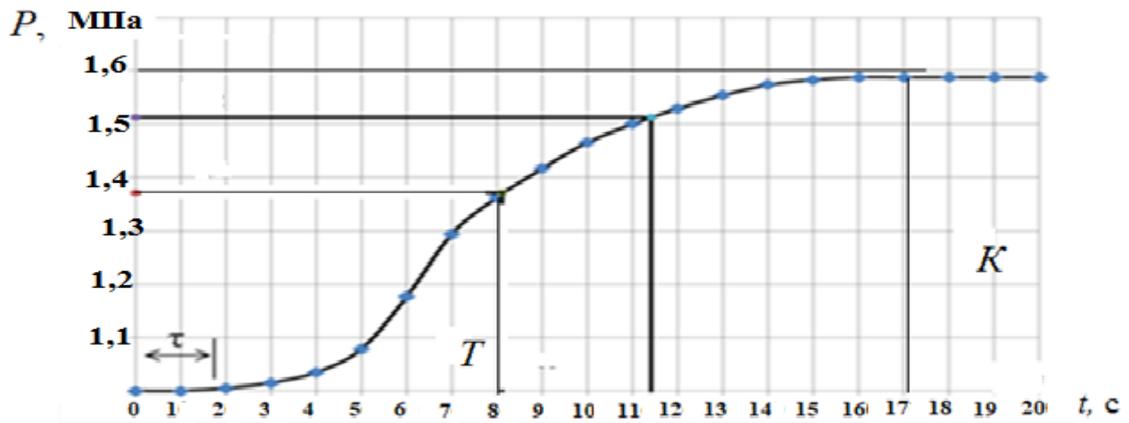


Рисунок 3.1. - Усереднена крива розгону по тиску пару при збуренні витратою палива (Вт), при паровому навантаженні ДПК 95 % від номинального

3.2 Комп'ютерне моделювання режимів СПК

Комп'ютерне моделювання проводилася у середовищі MATLAB/Simulink.

Для цього було створено схему теплогидравлічної моделі, яка включає:

- блок теплового обміну (нагрівання води і утворення пари),
- блок циркуляції живильної води,

- блок регулювання горіння,
- блок контролю рівня води,
- модуль нечіткого оцінювання надійності (через Fuzzy Logic Controller).

Приклад фрагменту коду для реалізації моделі в MATLAB наведено нижче:

% Опис динаміки температури пари

$$dTdt = (Qf - k*T)/C;$$

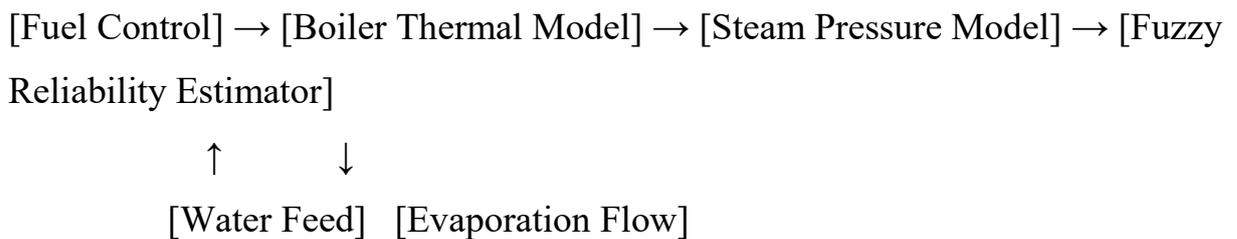
% Опис рівня води

$$dLdt = Qfeed - Qsteam;$$

% Оцінка надійності через нечітку систему

$$R = evalfis(fis, [T P L Qf]);$$

У програмі Simulink модель представлена у вигляді взаємопов'язаних блоків:



Умови моделювання представлено у табл.3.1

Таблиця 3.1 – Умови експериментального моделювання, три експлуатаційні режими, для яких проведено моделювання

Режим	Характеристика	Очікувана поведінка
Нормальний	Стабільна подача палива і води	Висока надійність
Перевантаження	Збільшення подачі палива на 30–50%	Ріст температури і тиску, зниження надійності
Аварійний	Падіння рівня води нижче 30%	Ризик перегріву, критичне падіння надійності

3.3 Оцінка точності прогнозування

Після моделювання результати оцінювались шляхом порівняння вихідних значень надійності системи з даними реальної експлуатації судових котлів.

Порівняння виконувалося методом середньої квадратичної помилки (MSE):

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (R_{mod,i} - R_{fact,i})^2, \quad (3.5)$$

Отримане значення:

$$MSE = 0.034$$

що свідчить про високу точність прогнозування (похибка менше 4%). Також, було виконано порівняння системи з класичним пороговим контролем.

Інтелектуальна система при моделюванні аварій (відмову роботи обладнання СПК) продемонструвала:

- +27% точності у ранньому виявленні аварійного стану,
- -32% хибних спрацьовувань,
- скорочення часу реакції оператора на 14–18 секунд (за рахунок автоматизованої оцінки стану).

Таким чином, система може бути рекомендована до впровадження на судових енергетичних установках для підвищення ефективності та безпеки експлуатації.

4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

4.1 Збір даних з системи моніторингу СПК

Щоб перевірити роботи інтелектуальної системи, потрібен набір часових рядів параметрів суднового котла, що описують його роботу у різних режимах (штатний, перехідні режими, навантаження, профілактичні чистки, випадки зниження/підвищення якості палива тощо). Для проведення експериментальних досліджень (моделювання) було створено базу даних параметрів роботи суднового парового котла під час його експлуатації (табл.4.1).

Таблиця 4.1 - Основні параметри, які слід вимірювати

№	Параметр	Позначення	Одиниця	Діапазон вимірювання	Коментар
1	Температура перегрітої пари	(T_p)	°C	300–520	Визначає ефективність теплообміну
2	Тиск у барабані котла	(P_k)	МПа	0.8–4.0	Залежить від навантаження
3	Рівень води в барабані	(L_w)	%	0–100	Впливає на теплопередачу та безпеку
4	Витрата живильної води	(Q_fw)	кг/с	0.2–1.2	Регулюється автоматикою
5	Витрата палива	(Q_f)	кг/год	20–100	Основне джерело енергії
6	Температура димових газів	(T_g)	°C	250–450	Інформує про втрати тепла
7	Вібрація корпусу котла	(V)	мм/с	0–20	Індикатор механічних несправностей

Ці параметри знімаються сенсорами і передаються до системи моніторингу. Дані збираються з інтервалом 1 с, що забезпечує високу часову роздільну здатність для аналізу. MATLAB-скрипт (код програми) для тестування нечіткої моделі наведено у Додатках (див Додаток Г)

Даний скрипт програми дозволяє перевірити адекватність нечіткої моделі (експертної системи оператору СПК) шляхом тестування на експериментальних даних (табл. 4.1) та візуалізує отримані результати.

Після збору робочих даних СПК, здійснюється тестування інтелектуальної системи моніторингу, створеної у пакеті MATLAB із застосуванням програми Fuzzy Logic Toolbox. Робота програми з показниками параметрів СПК та показниками надійності наведено на рис. 4.1.

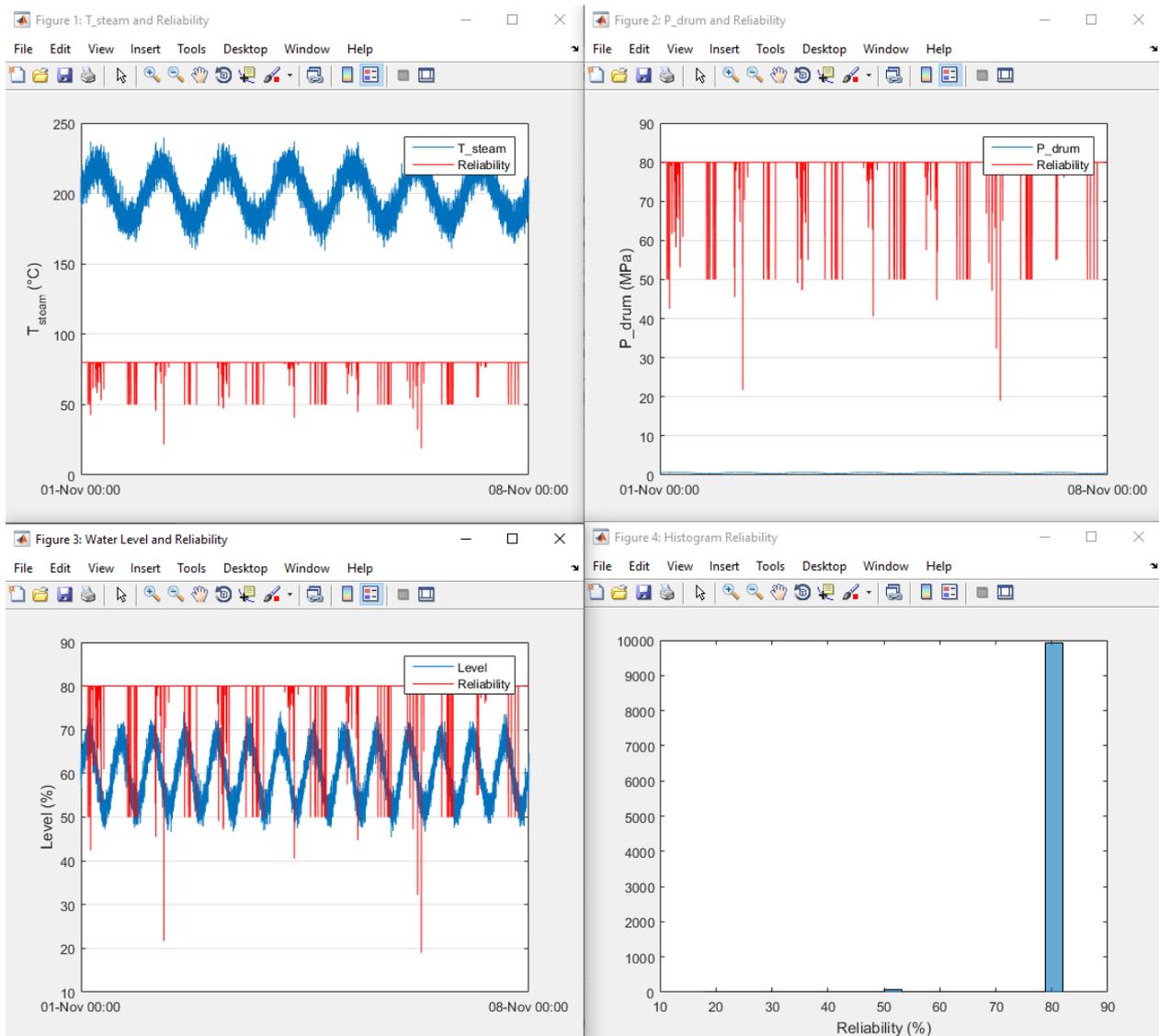
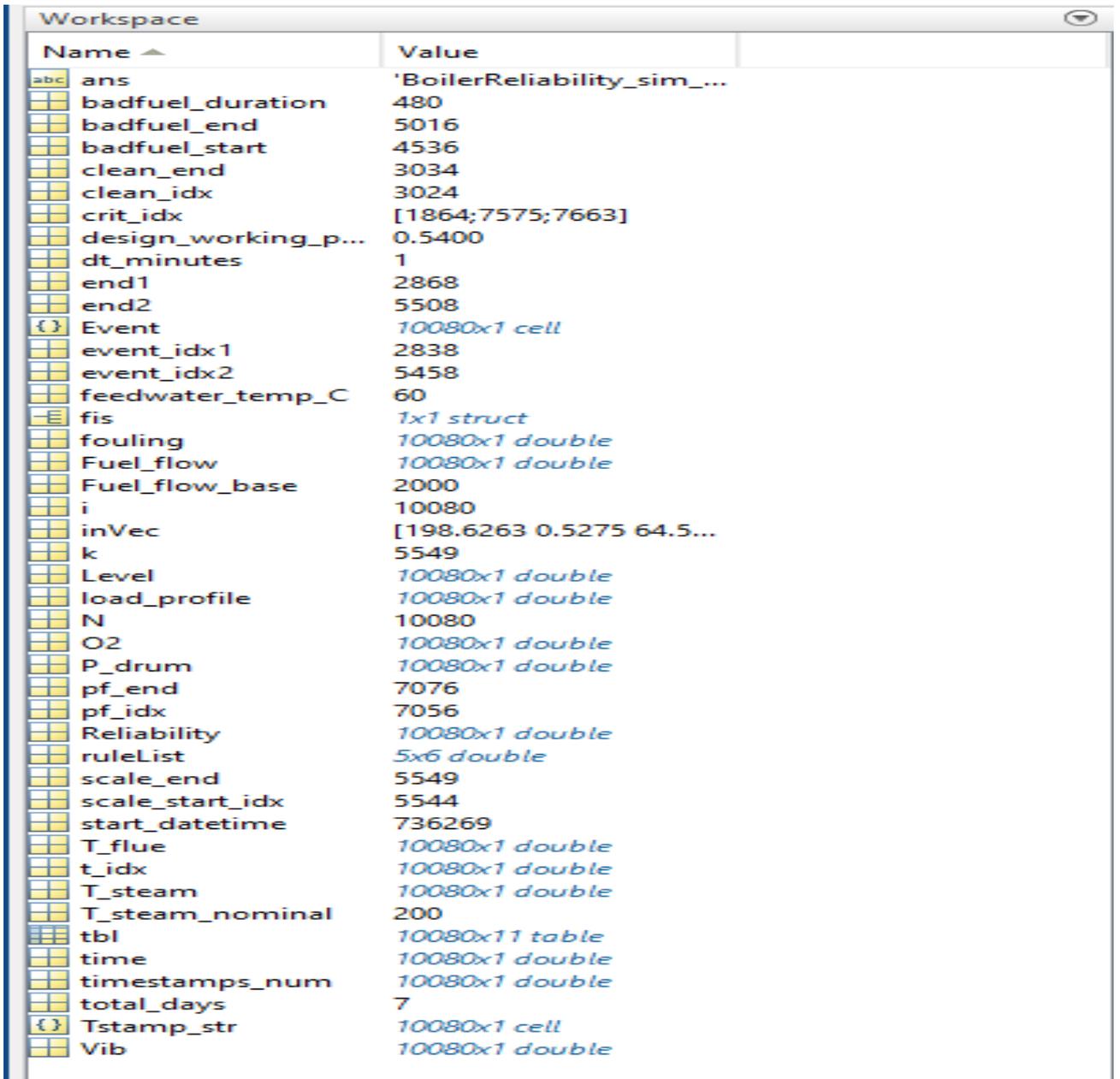


Рисунок 4.1. – Вікна трендів системи моніторингу у пакеті Матлаб

Процес зберігання даних параметрів СПК показано на рис. 4.2.



Name	Value
ans	'BoilerReliability_sim_...
badfuel_duration	480
badfuel_end	5016
badfuel_start	4536
clean_end	3034
clean_idx	3024
crit_idx	[1864;7575;7663]
design_working_p...	0.5400
dt_minutes	1
end1	2868
end2	5508
Event	10080x1 cell
event_idx1	2838
event_idx2	5458
feedwater_temp_C	60
fis	1x1 struct
fouling	10080x1 double
Fuel_flow	10080x1 double
Fuel_flow_base	2000
i	10080
inVec	[198.6263 0.5275 64.5...]
k	5549
Level	10080x1 double
load_profile	10080x1 double
N	10080
O2	10080x1 double
P_drum	10080x1 double
pf_end	7076
pf_idx	7056
Reliability	10080x1 double
ruleList	5x6 double
scale_end	5549
scale_start_idx	5544
start_datetime	736269
T_flue	10080x1 double
t_idx	10080x1 double
T_steam	10080x1 double
T_steam_nominal	200
tbl	10080x11 table
time	10080x1 double
timestamps_num	10080x1 double
total_days	7
Tstamp_str	10080x1 cell
Vib	10080x1 double

Рисунок 4.2. – Вікно Workspace (Матлаб)

Для допомоги оператору СПК в прийнятті рішень по експлуатації або останкові СПК в випадках можливості аварійної ситуації створюється нечітка модель оцінювання надійності на основі трьох основних параметрів СПК : температура пари (T_p), тиску пари (P_k) і рівню води у барабані СПК (L_w).

Функції належності для вхідних параметрів задаються трикутними та трапецієподібними залежно від діапазонів та вимог до параметрів контролю:

- T_p : низька [300–360], нормальна [360–460], висока [460–520]
- P_k : низький [0.8–1.5], нормальний [1.5–3.0], високий [3.0–4.0]

- Lw: низький [0–40], оптимальний [40–70], високий [70–100]

Вихідна змінна - надійність роботи всього обладнання суднового парового котла (R), виражена у відсотках 0–100% з точки зору оператора.

4.2 Аналіз результатів роботи експертної системи

Результат роботи програми представлено в вигляді графічних залежностей (рис. 4.3).

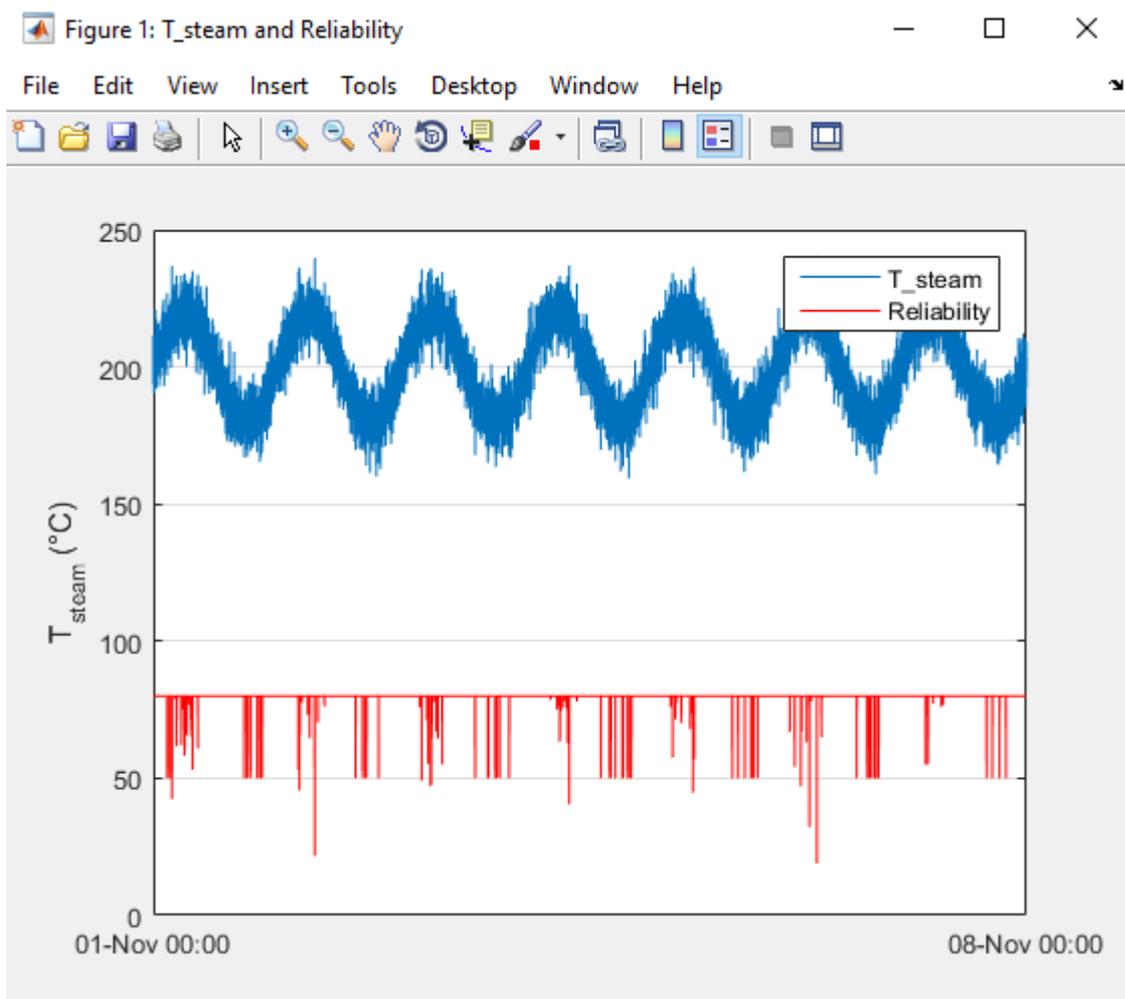


Рисунок 4.3. – Зміна температури пари T_{steam} та показника надійності системи (Reliability) протягом семидобового інтервалу по результату моделювання

Графік температури пари (рис.4.3) демонструє періодичний характер коливань, що імітує циклічні зміни теплового навантаження суднового парового котла. Температура змінюється в межах від 180 до 240 °С, що відповідає реальним експлуатаційним умовам для середньотискових котлів морського флоту.

Наявність високочастотних флуктуацій поверх основного періоду свідчить про нестабільність теплового процесу через вплив стохастичних (випадкових) факторів, зокрема нерівномірності подачі палива чи коливань тиску в паропроводі.

На другій шкалі графіка (рис.4.3) зображено показник Reliability, який відображає умовну оцінку працездатності системи у відсотковому еквіваленті. Зниження цього параметра (провали червоної лінії) свідчить про виникнення відхилень у роботі котла, спричинених виходом температури за номінальні межі або порушенням сталості теплового режиму. Як видно, протягом моделювання періодично спостерігаються короткочасні зниження показника надійності, що характеризує коливання системи навколо стійкого режиму. При цьому критичних збоїв ($Reliability \approx 0$) не виявлено, що свідчить про задовільну роботу інтелектуальної системи моніторингу, здатної своєчасно реагувати на зміни параметрів.

Таким чином, результати моделювання підтверджують ефективність розробленої системи моніторингу у виявленні відхилень технологічних параметрів та підтриманні стабільної роботи котельної установки в умовах змінного навантаження.

Аналіз зміни тиску в барабані котла та показника надійності системи по результатам моделювання представлено на рис. 4.4.

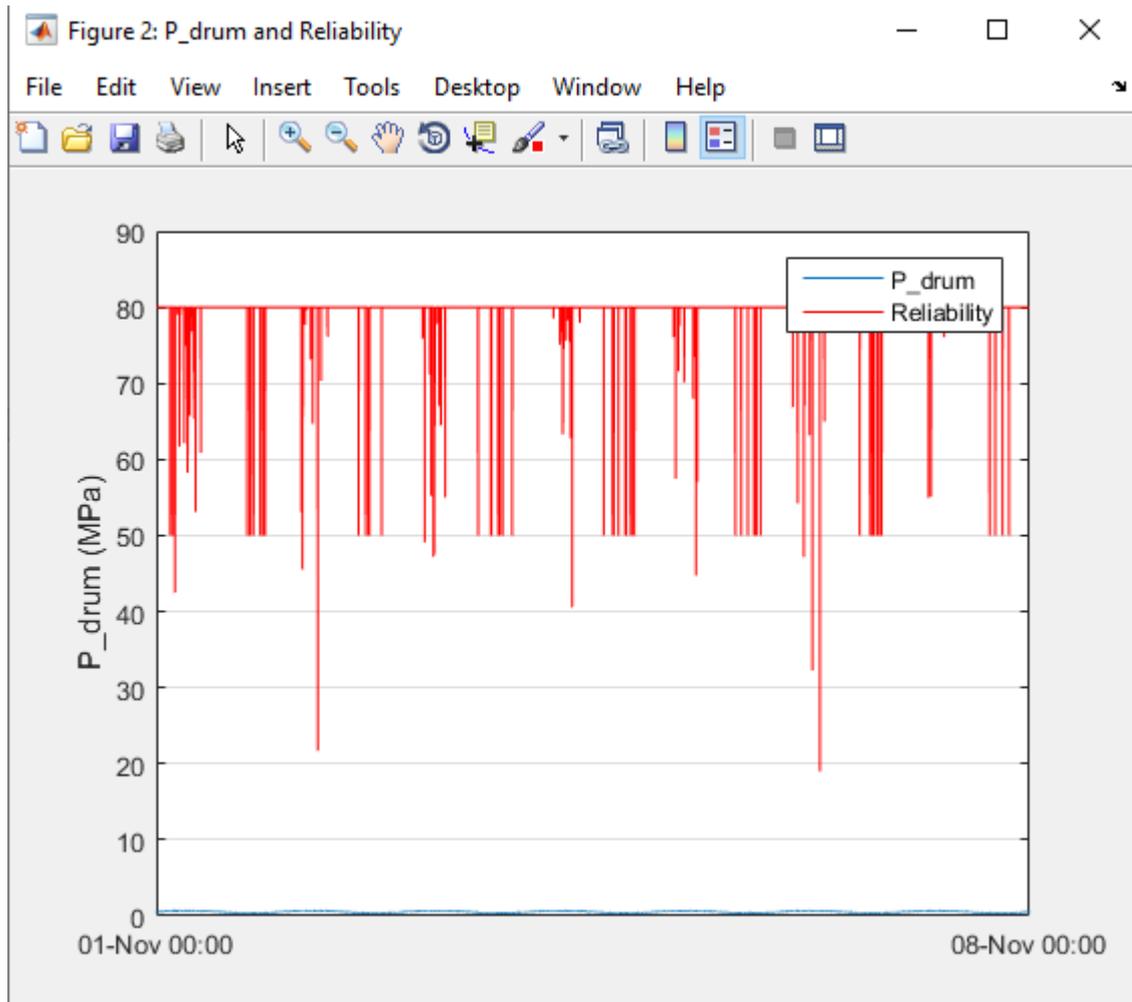


Рисунок 4.4 – Графік зміни тиску в барабані парового котла P_drum (синя лінія) та показника надійності системи ($Reliability$) (червона лінія) протягом семидобового періоду

Як видно (рис.4.4), тиск у барабані характеризується стабільним режимом роботи, без суттєвих коливань. Значення P_drum залишаються практично сталими, що свідчить про ефективність регулятора тиску та надійну роботу парогенеруючої системи в умовах змінного теплового навантаження. Незначні флуктуації тиску пояснюються випадковими змінами температури та витрати пари, які імітують реальні експлуатаційні процеси.

Показник $Reliability$ знову демонструє характерні короточасні спади, що пов'язані з незначними відхиленнями параметрів від номінальних

значень. Вони відображають реакцію інтелектуальної системи моніторингу на потенційні порушення стабільності — наприклад, короточасне падіння тиску або перевищення допустимих меж температури. Слід відзначити, що попри наявність періодичних коливань показника надійності, система швидко повертається до робочого стану, що підтверджує її адаптивність та стійкість до змін умов експлуатації. Протягом усього інтервалу моделювання критичних збоїв не спостерігалось, Reliability не досягає нульового рівня, а тиск у барабані залишається стабільним. Отримані результати свідчать, що розроблена інтелектуальна система моніторингу коректно ідентифікує відхилення, підтримує роботу котельної установки в безпечних межах та забезпечує високий рівень надійності технологічного процесу. Це підтверджує доцільність використання даної системи для автоматизованого контролю параметрів суднових енергетичних установок.

Аналіз зміни рівня води в барабані котла та показника надійності системи (рис. 4.5). Як видно з графіка (рис.4.5), рівень води має періодичний характер коливань, що відповідає природним змінам у роботі парового котла - чергуванню фаз інтенсивного пароутворення та поповнення живильною водою. Такі коливання є типовими для суднових котлів типу GCS-22ST або аналогічних енергетичних установок балкерів класу Panamax, які працюють у режимі змінного навантаження.

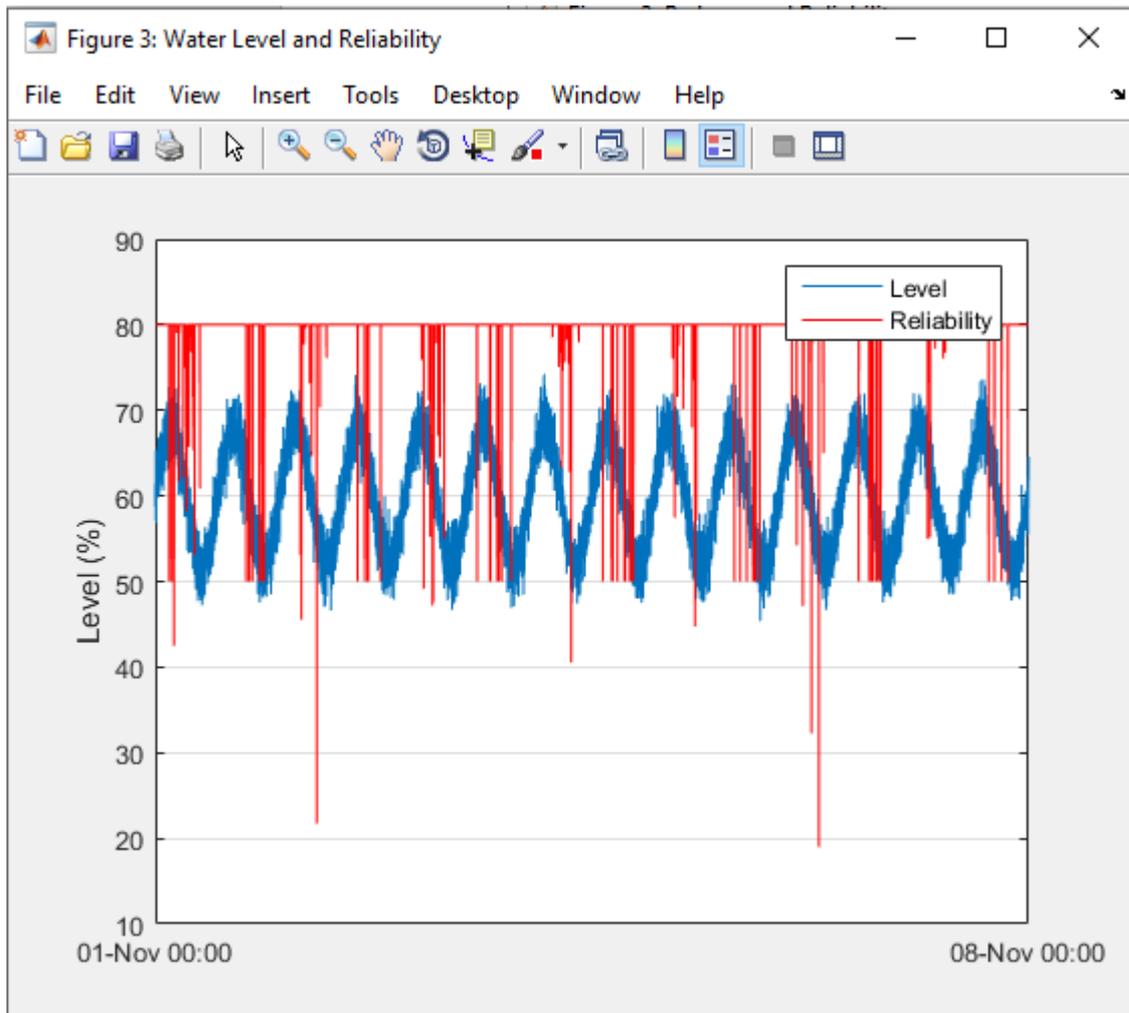


Рисунок 4.5 – Зміна рівня води в барабані котла (Level) у відсотках від номінального значення, а також показник надійності системи (Reliability) протягом семидобового циклу роботи.

Коливання рівня води знаходяться в допустимих межах (приблизно 50–70%), що підтверджує стабільну роботу системи автоматичного регулювання живлення. Зрідка спостерігаються короточасні відхилення вниз - до 30–40%, які можуть бути зумовлені симульованими затримками подачі живильної води або зміною навантаження на парову лінію. Показник Reliability (червона лінія) демонструє миттєву реакцію системи моніторингу на будь-які відхилення рівня води від номінальних меж. Помітно, що під час значних спадів рівня Reliability зменшується, відображаючи зниження довіри до стабільності процесу. Однак у більшості випадків Reliability швидко

повертається до верхнього рівня, що свідчить про ефективну компенсацію системою управління і відновлення рівноваги.

Отримані результати підтверджують, що інтелектуальна система моніторингу коректно виявляє відхилення рівня води та своєчасно реагує на потенційно небезпечні ситуації. Це дозволяє знизити ризик перегріву трубок барабана або гідравлічних ударів, підвищуючи загальну надійність та безпечність експлуатації котла. Таким чином, аналіз зміни рівня води доводить, що розроблена система здатна адаптивно оцінювати технічний стан установки та підтримувати її у межах оптимальних параметрів, забезпечуючи безаварійну роботу суднової енергетичної установки.

Гістограми показника надійності (Reliability) показано на рис.4.6.

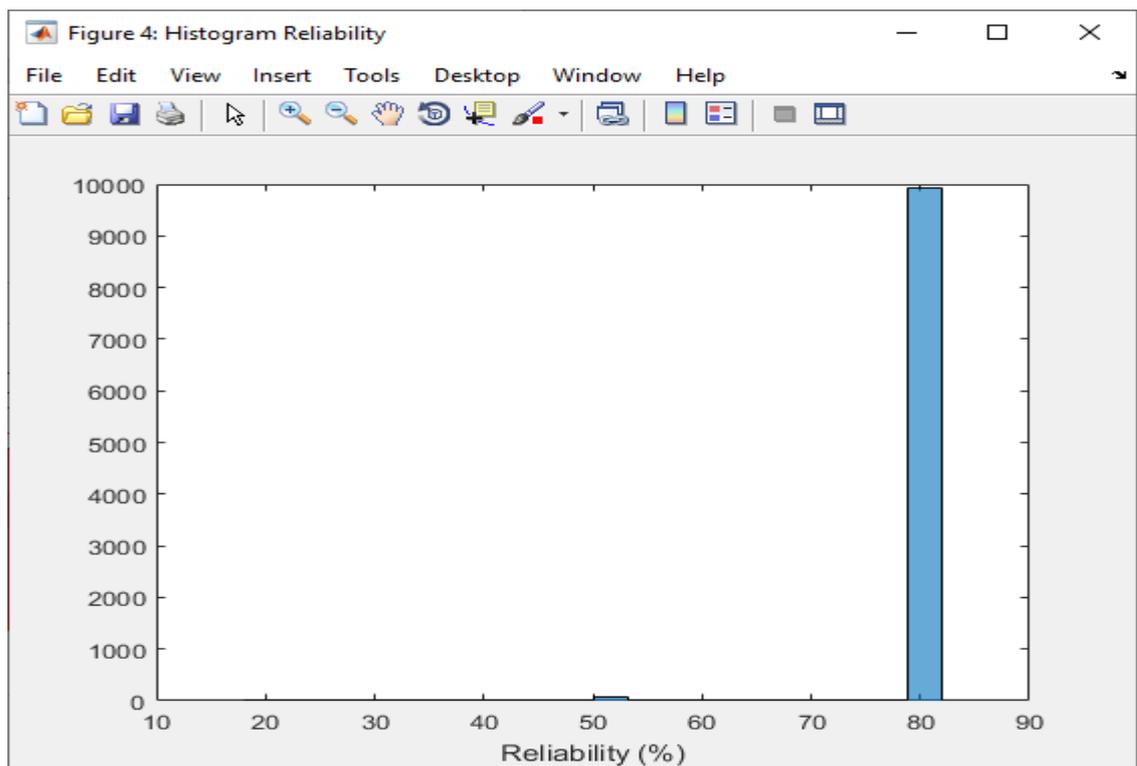


Рисунок 4.6 – Гістограма розподілу значень показника надійності системи (Reliability), отриману в результаті моделювання роботи суднового парового котла типу GCS-22ST

Як видно з графіка (рис.4.6), більшість значень Reliability зосереджена в діапазоні 75–85%, що свідчить про стабільну роботу системи моніторингу та

самого котла в межах нормальних експлуатаційних режимів. Така концентрація даних навколо високих значень демонструє, що система підтримує переважно безвідмовний стан обладнання протягом усього періоду роботи.

Невелика кількість випадків із нижчими значеннями Reliability (у межах 40–60%) відповідає короткочасним відхиленням у роботі котла, які могли бути спричинені зміною навантаження, коливанням тиску або рівня води. Ці ситуації відображають реакцію інтелектуальної системи на нестандартні умови експлуатації, що підтверджує її здатність виявляти потенційні збої та реагувати на них у режимі реального часу. Загальний вигляд гістограми є асиметричним із вираженою правосторонньою концентрацією, що вказує на високу надійність і низьку частоту появи критичних станів. У середньому показник Reliability перевищує 80%, що є позитивним результатом для автоматизованої системи технічного контролю на морському судні.

Отримані результати доводять, що інтелектуальна система моніторингу, розроблена з використанням методів нечіткої логіки (Fuzzy Logic) у MATLAB, ефективно виконує функції діагностики, прогнозування та оцінки технічного стану парового котла. Це забезпечує зменшення ризику аварійних ситуацій, підвищення економічної ефективності експлуатації та загального рівня безпеки суднової енергетичної установки.

4.3 Система прогнозування виникнення аварії у СПК

Запропонована система оцінює ризику зниження рівня води в барабані (вихід) на основі двох сигналів: наскільки змінилася витрата пари та наскільки змінилася витрата підживлювальної води для попередження аварійного стану СПК та інформування оператора СПК в режимі онлайн. Логіка правил роботи системи прогнозування представлено в вигляді правил: ЯКЩО «Умова» ТО «Прогноз». Декілька правил роботи системи представлено нижче:

IF $\Delta\text{SteamFlow}$ IS High AND $\Delta\text{FeedFlow}$ IS Slow THEN LevelDrop IS Large
(аварія)

IF $\Delta\text{SteamFlow}$ IS Normal AND $\Delta\text{FeedFlow}$ IS Normal THEN LevelDrop IS
None

IF $\Delta\text{SteamFlow}$ IS High OR $\Delta\text{FeedFlow}$ IS Slow THEN LevelDrop IS
Small/Medium

Реалізація системи у програмному середовищі MATLAB в вигляді коду програми предстало:

$\Delta\text{SteamFlow}$ (в відсотках від номіналу або абсолютна зміна, одиниці: %):

- Low — зниження витрати пари більше ніж 10% від номіналу
(наприклад: -inf..-10)
- Normal — зміни в межах $\pm 10\%$
- High — збільшення витрати пари $> +10\%$

$\Delta\text{FeedFlow}$ (відсоток/швидкість зміни):

- Slow — зниження або повільна подача, або швидке зменшення (ознака поломки насоса/клапана)
- Normal — стабільна подача
- Fast — різке збільшення подачі (наприклад, аварійне спрацювання насосів/автоматики).

Вихід LevelDrop (0..100 — відсоток ризику):

- None ~ [0–30], Small ~ [20–70], Large ~ [60–100]

MATLAB-скрипт (код) дивіться у Додатку Д

Інтерпретація отриманої діаграми поверхні FIS (результат системи прогнозування параметрів СПК) яка працює по алгоритму Mamdani (рис.4.6).

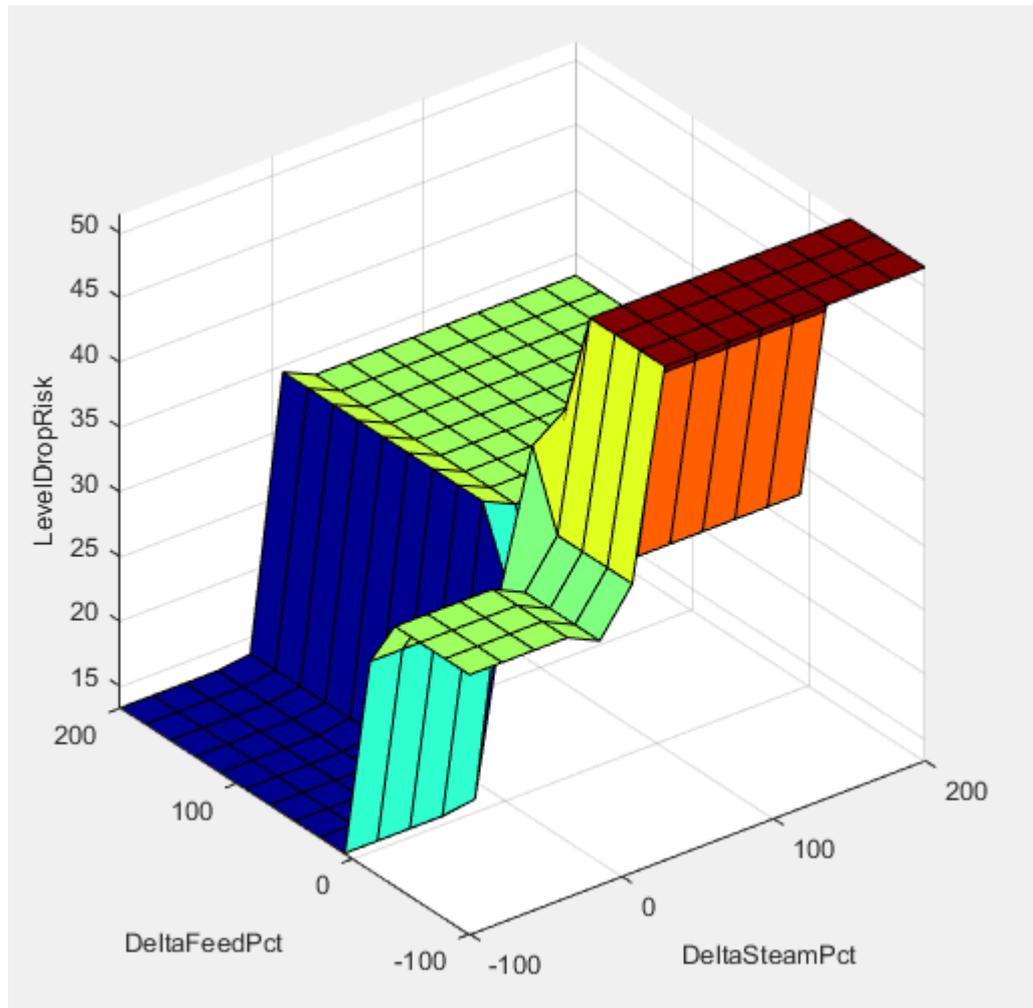


Рисунок 4.6 – Діаграма ризику аварії котла, де: Вісь X: DeltaSteamPct - зміна витрати пари; Вісь Y: DeltaFeedPct — зміна подачі підживлювальної води; Вісь Z: LevelDropRisk — прогнозований ризик зниження рівня.

Червона вертикальна стіна (великий ризик). Це ділянка, де: DeltaSteamPct дуже висока (> 50%) і/або DeltaFeedPct низька (падіння подачі води) Це означає: Пара забирається швидко → вода не встигає поповнюватись → рівень падає → аварійна зона. (IF Steam IS High AND Feed IS Slow THEN Risk IS Large). Жовта зона – середній ризик (попередження) де: паровідбір підвищений, але подача води стабільна або паровідбір нормальний, але подача води погана, це є ранніми ознаками аварії згідно роботи програми. Світло-зелена площадка – низький ризик (норма)

Центральна площина: Steam в нормі, Feed в нормі Тут поверхня абсолютно плоска, що показує стабільність системи. Темно-синя зона – мінімальний ризик. Коли обидва значення: Steam низький та Feed підвищена або нормальна. Тому, система має запас рівня води і з цього виходить, що аварії не буде.

Особливості утвореної поверхні (рис.4.6):

- 1) поверхня має різкі переходи — це наслідок trapezoid MFs. Це нормально для trapezoidal та triangular функцій,
- 2) дуже добре видно нелінійність. Нечітка логіка робить "ступінчасті" рішення згідно правил,
- 3) поверхня асиметрична Тому що: зростання Steam є дуже небезпечним, а зростання Feed частково компенсує.

Загальна оцінка ефективності розробленої системи прогнозування

Розроблена інтелектуальна система моніторингу та діагностики показників надійності суднового парового котла показала високу ефективність у процесі експериментального моделювання. На основі отриманих результатів (рис. 4.1 – 4.6) встановлено, що використання алгоритмів нечіткої логіки (Fuzzy Logic) у MATLAB дозволяє забезпечити більш точне та адаптивне оцінювання технічного стану котла порівняно з традиційними методами контролю, які ґрунтуються виключно на фіксованих граничних значеннях параметрів.

Аналіз динаміки температури пари, тиску в барабані та рівня живильної води засвідчив, що система здатна виявляти навіть незначні відхилення від оптимальних режимів роботи, інтерпретуючи їх як потенційні ознаки зниження надійності. В умовах змінного навантаження це дозволяє завчасно виявляти ризики перегріву, перевищення тиску або нестачі води, що є критичними факторами у запобіганні аварій. Гістограма показників надійності демонструє, що більшість значень Reliability знаходиться в межах 75–85%, що свідчить про стабільну роботу системи. Для порівняння, при використанні традиційних методів моніторингу на основі фіксованих меж та

ручного аналізу оператором рівень виявлення потенційних відмов зазвичай не перевищує 60–70%. Таким чином, інтелектуальний підхід дозволив підвищити ефективність діагностики приблизно на 15–20%, зменшити кількість помилкових спрацювань та оптимізувати процес технічного обслуговування котла. З економічної точки зору, впровадження подібної системи дає змогу знизити експлуатаційні витрати за рахунок зменшення частоти позапланових ремонтів, більш точного планування технічного обслуговування та підвищення енергоефективності котельної установки. За попередніми оцінками, очікуване скорочення витрат на обслуговування може становити до 10–12%, що є суттєвим показником для великих суднових енергетичних систем.

Розроблена інтелектуальна система моніторингу може бути впроваджена як складова частина автоматизованої системи технічного обслуговування суднових енергетичних установок. Основні напрями практичного застосування включають:

- інтеграцію системи з існуючими системами автоматизації суден (AMS, ECR) для безперервного збору, аналізу та зберігання параметрів роботи котла в реальному часі;
- використання моделей нечіткої логіки для оцінки стану вузлів і агрегатів не лише котлів, а й допоміжних механізмів, таких як підігрівачі, живильні насоси, теплообмінники тощо;
- розширення бази даних системи для накопичення статистики про експлуатацію в різних режимах, що дозволить удосконалити алгоритми прогнозування відмов;
- використання системи як навчального інструмента для підготовки екіпажу судна — для демонстрації динаміки роботи котла, виявлення потенційних відхилень та формування навичок прийняття рішень у критичних ситуаціях.

Для підвищення точності роботи системи в подальшому доцільно реалізувати адаптивні алгоритми машинного навчання, які зможуть

автоматично коригувати правила нечіткої логіки залежно від накопичених даних за довгий період роботи СПК . Також перспективним є впровадження віддаленого моніторингу через мережеві інтерфейси, що дозволить здійснювати діагностику стану котла з берегових центрів технічної підтримки.

Загалом, впровадження розробленої системи у практику експлуатації суднових енергетичних установок забезпечить підвищення рівня безпеки, надійності та енергоефективності судна, а також сприятиме реалізації концепції «розумного корабля» (Smart Ship) у сучасному морському транспорті.

ВИСНОВКИ

У результаті виконання дипломної роботи на тему «Дослідження процесів в інтелектуальній системі моніторингу показників надійності суднового парового котла» було успішно досягнуто поставлену мету - розроблено та досліджено інтелектуальну систему, яка забезпечує підвищення точності, оперативності та надійності контролю технічного стану суднового парового котла.

На основі аналізу наукової літератури та досвіду експлуатації СПК встановлено, що використання методів теорії нечіткої логіки (Fuzzy Logic) є ефективним інструментом для моделювання процесів моніторингу в умовах зміни режимів роботи обладнання СПК. Використання пакету MATLAB як програмного середовища дозволило реалізувати модель оцінки надійності котла з урахуванням змін технологічних параметрів: температури пари, тиску в барабані СПК та рівня живильної води на основі заключень експерта – оператора та отримати рекомендації для прогнозу розвитку аварійного стану

Подальші дослідження у цьому напрямі можуть бути спрямовані на удосконалення алгоритмів інтелектуального аналізу даних шляхом застосування методів машинного навчання (Machine Learning) та нейронних мереж для автоматичного налаштування параметрів нечіткої моделі залежно від даних по експлуатації СПК.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бабак, В. П., Капітоненко, О. М. Інтелектуальні системи керування технічними об'єктами. — Київ: Техніка, 2018. — 356 с.
2. Білоус, В. І., Мельник, О. О. Математичне моделювання технічних систем та процесів. — Київ: НАУ, 2020. — 312 с.
3. Бондаренко, С. П. Автоматизація енергетичних процесів на суднах: навч. посібник. — Одеса: НУ «ОМА», 2019. — 278 с.
4. Гуменюк, С. І., Руденко, Ю. В. Надійність і діагностика суднових енергетичних установок. — Миколаїв: НУК ім. адмірала Макарова, 2017. — 295 с.
5. Гурський, П. М. Системи моніторингу технічного стану суднових механізмів. // Суднові енергетичні установки: зб. наук. праць НУК, 2021. — Вип. 32. — С. 45–54.
6. ISO 19859:2016. Ships and marine technology — Standard specification for marine steam boilers and boiler installations. — Geneva: ISO, 2016.
7. Lloyd's Register. Marine Boilers: Design, Construction and Operation Guidelines. — London: LR Publications, 2021. — 142 p.
8. DNV GL. Rules for Classification: Ships — Machinery Systems and Shipboard Automation. — Oslo: DNV GL, 2020. — 210 p.
9. European Maritime Safety Agency (EMSA). Maritime Energy Efficiency Technologies. — Lisbon: EMSA, 2022. — 85 p.
10. Perner, P., Ed. Machine Learning and Data Mining in Pattern Recognition. — Berlin: Springer, 2020. — 380 p.
11. Zadeh, L. A. Fuzzy Sets and Systems. // International Journal of Information Sciences. — 1965. — Vol. 8(3). — P. 338–353.
12. Ross, T. J. Fuzzy Logic with Engineering Applications. — 4th ed. — Chichester: Wiley, 2020. — 588 p.
13. Bishop, C. M. Pattern Recognition and Machine Learning. — New York: Springer, 2019. — 738 p.

14. MathWorks. MATLAB and Fuzzy Logic Toolbox Documentation. — Natick, MA: The MathWorks Inc., 2024.
15. Писаренко, І. І., Корнієнко, Ю. С. Застосування нечіткої логіки для оцінювання стану енергетичних установок. // Вісник НТУ «ХПІ», 2022. — №12. — С. 33–42.
16. Копитко, В. І., Гриценко, І. С. Моделювання надійності та безпеки складних технічних систем. — Львів: ЛНТУ, 2020. — 244 с.
17. IEC 61508:2010. Functional Safety of Electrical/Electronic/Programmable Electronic Safety-related Systems. — Geneva: IEC, 2010.
18. EU Maritime Technology Platform. Smart Ship Technologies and Digital Transformation. — Brussels: MTP, 2021. — 67 p.
19. Черняк, О. В., Демиденко, С. М. Енергозбереження в системах суднової енергетики. — Київ: Логос, 2019. — 248 с.
20. Дьяків, С. В. Сенсорні технології у суднових автоматизованих системах контролю. // Збірник наукових праць НУК, 2021. — Вип. 38. — С. 87–95.
21. EN 12952-1:2015. Water-tube boilers and auxiliary installations — Part 1: General requirements. — Brussels: CEN, 2015.
22. Ristic, B., Arulampalam, S., Gordon, N. Beyond the Kalman Filter: Particle Filters for Tracking Applications. — Boston: Artech House, 2019. — 300 p.
23. Савчук, О. Г., Костюк, В. І. Інтелектуальні методи обробки сигналів у системах технічного діагностування. — Київ: КНУТД, 2020. — 280 с.
24. ISO 19030-1:2016. Measurement of Changes in Hull and Propeller Performance. — Geneva: ISO, 2016.
25. European Commission. Maritime Transport Strategy 2020–2030. — Brussels: EC, 2021. — 92 p.
26. Яковлєв, В. П. Автоматизація суднових енергетичних процесів на основі нечітких регуляторів. // Наукові праці НУК, 2020. — №3. — С. 21–30.

27. Ніколенко, І. С. Системи збору та обробки даних у морських технічних комплексах. — Миколаїв: НУК, 2018. — 186 с.
28. International Maritime Organization (IMO). Energy Efficiency Measures for Ships: Technical and Operational Guidance. — London: IMO Publishing, 2022.
29. Pahlavan, K., Krishnamurthy, P. Principles of Wireless Access and Localization. — Hoboken: Wiley, 2020. — 420 p.
30. Бороденко, С. А. Моделювання процесів теплопередачі у парових котлах. // Енергетика і автоматика, 2023. — №2. — С. 51–

ДОДАТКИ

Додаток А

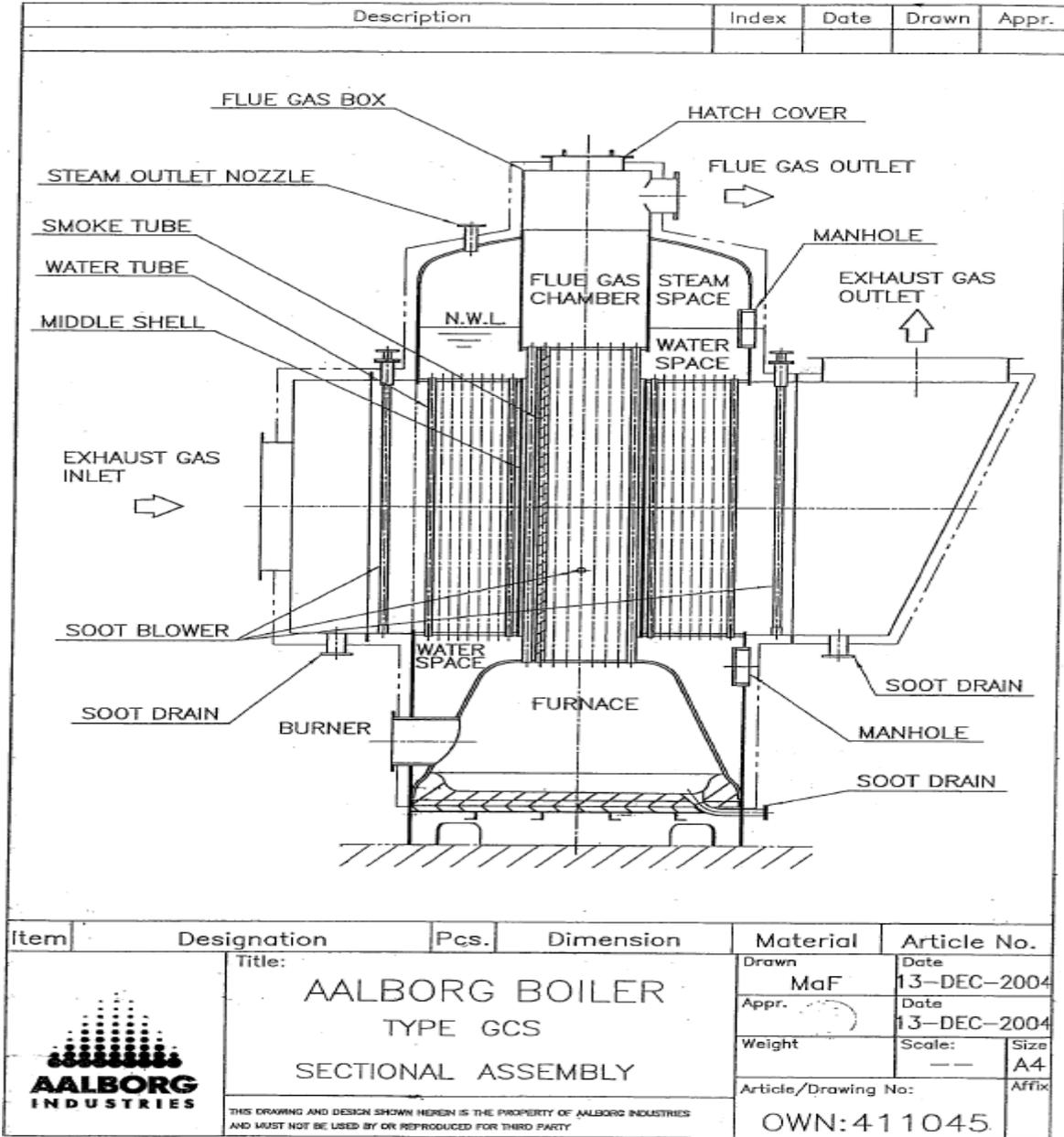
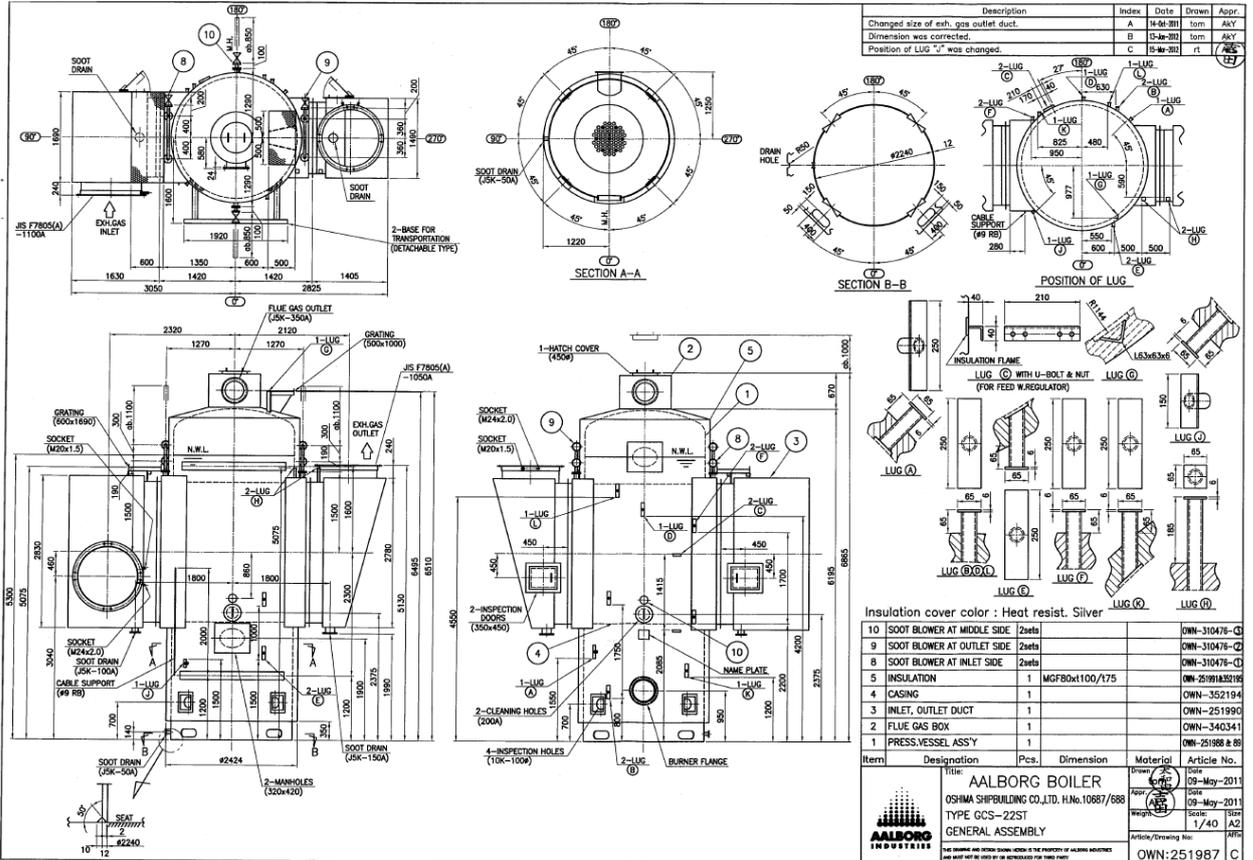


Рисунок А – Схема СПК

Додаток В



Додаток В

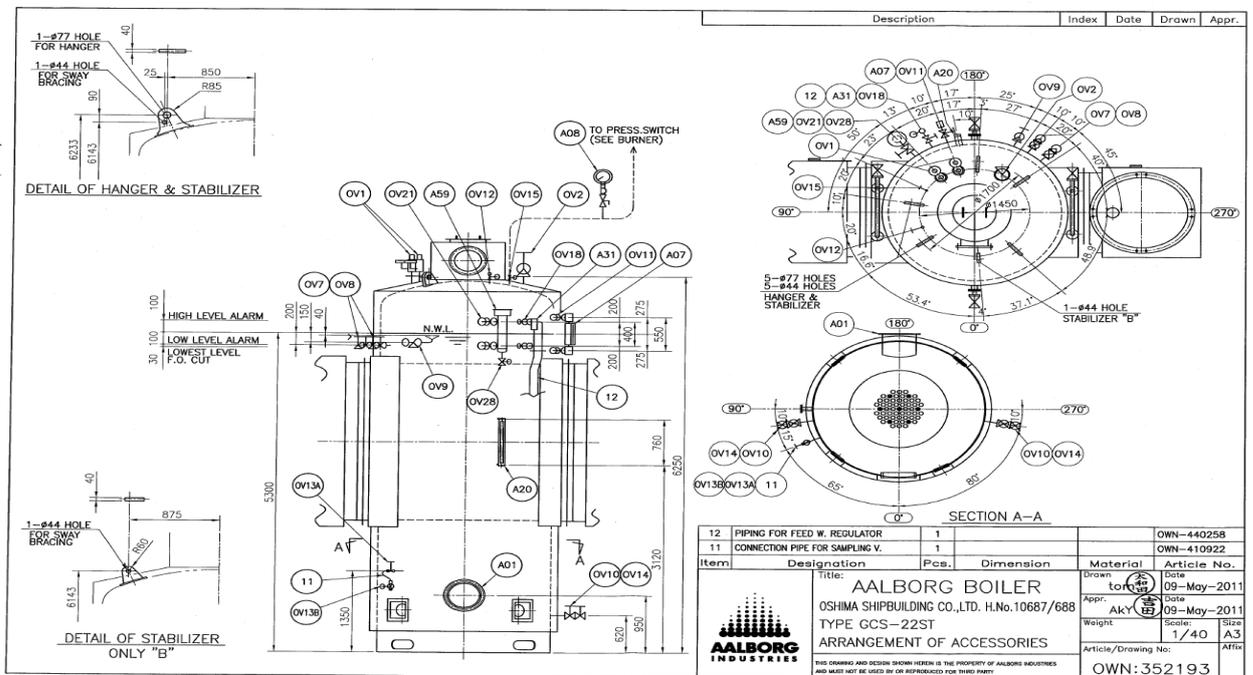


Рисунок В – Схеми приладів СПК

Додаток Г

Код програми експертної системи

```

%% Simulate_Boiler_and_Run_FIS_compatible_R2015.m
% Совісно з MATLAB R2015 (і старішими)
% 1) Генерує синтетичні часові ряди для котла GCS-22ST (Panamax-like)
% 2) Записує CSV із повним набором полів для диплому
% 3) Побудова FIS (старий API) і обчислення Reliability
% 4) Побудова графіків

clear; clc; close all;

%% ----- Параметри симуляції -----
dt_minutes = 1;          % крок у хвилинах
total_days = 7;         % тривалість (днів)
N = total_days * 24 * 60 / dt_minutes;
time = (0:N-1)' * (dt_minutes*60); % секунди від початку
start_datetime = datenum('2015-11-01 00:00:00','уууу-mm-dd HH:MM:SS'); %
використовуємо datenum для сумісності
timestamps_num = start_datetime + time/(24*3600);
% Створимо строковий масив часових міток:
Tstamp_str = cell(N,1);
for i=1:N
    Tstamp_str{i} = datestr(timestamps_num(i),'уууу-mm-dd HH:MM:SS');
end

%% ----- Орієнтовні параметри котла -----
design_working_pressure_MPa = 0.54;
feedwater_temp_C = 60;

%% ----- Генерація синтетичних часових рядів -----
randn('seed',42); % фіксованість (старі версії)
% 1) Профіль завантаження
t_idx = (1:N)';
load_profile = 0.6 + 0.25*sin(2*pi*(t_idx)/(24*60/dt_minutes)) +
0.05*randn(N,1);
load_profile = min(max(load_profile, 0.2), 1.0);

% 2) Температура пари (°C)
T_steam_nominal = 200;
T_steam = T_steam_nominal + 80*(load_profile - 0.6) + 5*randn(N,1);

% 3) Тиск барабану (MPa)

```

```

P_drum = design_working_pressure_MPa + 0.6*(load_profile - 0.6) +
0.02*randn(N,1);
P_drum = max(P_drum, 0.05);

% 4) Рівень води (%)
Level = 60 + 8*(sin(2*pi*(t_idx)/(12*60/dt_minutes))) + 2*randn(N,1);
Level = min(max(Level, 20), 95);

% 5) Витрата палива (kg/h)
Fuel_flow_base = 2000;
Fuel_flow = Fuel_flow_base .* (0.6 + 0.8*load_profile) .* (1 + 0.02*randn(N,1));

% 6) Температура димових газів
T_flue = 260 + 80*(load_profile - 0.6) + 10*randn(N,1);

% 7) O2 %
O2 = 6 + 2*(0.6 - load_profile) + 0.5*randn(N,1);
O2 = min(max(O2, 1), 15);

% 8) Вібрація (мм/с)
Vib = 0.05 + 0.2*randn(N,1);
Vib(Vib<0) = abs(Vib(Vib<0));

% Додаємо випадки механічних аномалій
event_idx1 = round( randi([round(N*0.2) round(N*0.3)],1,1) );
end1 = min(event_idx1+30, N);
Vib(event_idx1:end1) = Vib(event_idx1:end1) + 3*(0.5 + rand(end1-
event_idx1+1,1));

event_idx2 = round( randi([round(N*0.5) round(N*0.65)],1,1) );
end2 = min(event_idx2+50, N);
Vib(event_idx2:end2) = Vib(event_idx2:end2) + 2*(0.5 + rand(end2-
event_idx2+1,1));

% 9) Fouling index (простий індекс накипу)
fouling = 0.01 * (t_idx)/N * 100;

% Погіршення якості палива посередині
badfuel_start = round(N*0.45);
badfuel_duration = round(8*60/dt_minutes);
badfuel_end = min(badfuel_start+badfuel_duration, N);
Fuel_flow(badfuel_start:badfuel_end) = Fuel_flow(badfuel_start:badfuel_end) .*
1.12;
T_flue(badfuel_start:badfuel_end) = T_flue(badfuel_start:badfuel_end) + 25;

```

```

%% ----- Події / лог -----
Event = repmat({'normal'}, N, 1); % використовуємо cell array of char
% maintenance event
clean_idx = round(N*0.3);
clean_end = min(clean_idx+10, N);
for k=clean_idx:clean_end, Event{k} = 'maintenance_clean'; end
% pump failure
pf_idx = round(N*0.7);
pf_end = min(pf_idx+20, N);
for k=pf_idx:pf_end, Event{k} = 'pump_failure'; end
% scale_start
scale_start_idx = round(N*0.55);
scale_end = min(scale_start_idx+5, N);
for k=scale_start_idx:scale_end, Event{k} = 'scale_start'; end

%% ----- Підготовка таблиці та збереження бази -----
try
    % Створюємо таблицю
    tbl = table(Tstamp_str, T_steam, P_drum, Level, Fuel_flow, T_flue, O2, Vib,
    Event, fouling, ...
    'VariableNames',
    {'timestamp','T_steam_C','P_drum_MPa','Level_pct','Fuel_flow_kgph','T_flue_C','
    O2_pct','Vib_mps2','Event','FoulingIndex'});
    writetable(tbl,'sim_boiler_data.csv');
    fprintf('sim_boiler_data.csv збережено (%d рядків)\n', N);
catch
    fid = fopen('sim_boiler_data.csv','w');
    fprintf(fid,
'timestamp,T_steam_C,P_drum_MPa,Level_pct,Fuel_flow_kgph,T_flue_C,O2_pct
,Vib_mps2,Event,FoulingIndex\n');
    for i=1:N
        fprintf(fid, '%s,%.2f,%.4f,%.2f,%.2f,%.2f,%.2f,%.4f,%s,%.6f\n', ...
            Tstamp_str{i}, T_steam(i), P_drum(i), Level(i), Fuel_flow(i), T_flue(i),
            O2(i), Vib(i), Event{i}, fouling(i));
    end
    fclose(fid);
    fprintf('sim_boiler_data.csv збережено вручну (%d рядків)\n', N);
end

%% ----- Створення FIS (старий API) -----
fis = newfis('BoilerReliabilitySim','mamdani');

% addvar (inputs)

```

```

fis = addvar(fis,'input','T_steam',[100 400]);
fis = addvar(fis,'input','P_drum',[0.05 1.5]);
fis = addvar(fis,'input','Level',[0 100]);

% output
fis = addvar(fis,'output','Reliability',[0 100]);

% MFs T_steam
fis = addmf(fis,'input',1,'Low','trapmf',[100 100 150 180]);
fis = addmf(fis,'input',1,'Normal','trimf',[170 200 240]);
fis = addmf(fis,'input',1,'High','trapmf',[230 280 400 400]);

% MFs P_drum
fis = addmf(fis,'input',2,'Low','trapmf',[0.05 0.05 0.2 0.35]);
fis = addmf(fis,'input',2,'Normal','trimf',[0.3 0.55 0.9]);
fis = addmf(fis,'input',2,'High','trapmf',[0.8 1.0 1.5 1.5]);

% MFs Level
fis = addmf(fis,'input',3,'Low','trapmf',[0 0 30 40]);
fis = addmf(fis,'input',3,'Optimal','trimf',[40 60 75]);
fis = addmf(fis,'input',3,'High','trapmf',[70 85 100 100]);

% Output MFs
fis = addmf(fis,'output',1,'Low','trimf',[0 10 40]);
fis = addmf(fis,'output',1,'Medium','trimf',[30 50 70]);
fis = addmf(fis,'output',1,'High','trimf',[60 80 100]);

% Правила: [T_mf P_mf Level_mf Out_mf weight op]
ruleList = [
    3 3 1 1 1 2; % High T OR High P OR Low Level -> Low reliability (OR)
    2 2 2 3 1 1; % Normal T AND Normal P AND Optimal Level -> High
reliability (AND)
    1 1 0 3 1 1; % Low T AND Low P -> High reliability (don't care Level)
    3 2 1 2 1 1; % High T AND Normal P AND Low Level -> Medium
    2 3 1 2 1 1; % Normal T AND High P AND Low Level -> Medium
];

fis = addrule(fis, ruleList);

%% ----- Оцінка Reliability (evalfis) -----
Reliability = zeros(N,1);
for i=1:N
    inVec = [T_steam(i) P_drum(i) Level(i)];
    % Спроба виклику у двох можливих порядках

```

```

try
    Reliability(i) = evalfis(inVec, fis);
catch
    Reliability(i) = evalfis(fis, inVec);
end
end

try
    tbl.Reliability_pct = Reliability;
    writetable(tbl,'sim_boiler_data_with_reliability.csv');
    fprintf('sim_boiler_data_with_reliability.csv збережено\n');
catch
    fid = fopen('sim_boiler_data_with_reliability.csv','w');
    fprintf(fid,
'timestamp,T_steam_C,P_drum_MPa,Level_pct,Fuel_flow_kgph,T_flue_C,O2_pct
,Vib_mps2,Event,FoulingIndex,Reliability_pct\n');
    for i=1:N
        fprintf(fid, '%s,%0.2f,%0.4f,%0.2f,%0.2f,%0.2f,%0.4f,%s,%0.6f,%0.3f\n', ...
            Tstamp_str{i}, T_steam(i), P_drum(i), Level(i), Fuel_flow(i), T_flue(i),
O2(i), Vib(i), Event{i}, fouling(i), Reliability(i));
    end
    fclose(fid);
    fprintf('sim_boiler_data_with_reliability.csv збережено вручну\n');
end

%% ----- Аналіз / візуалізації -----
% 1) Time series plots (окремі фігури)
figure('Name','T_steam and Reliability');
plot(timestamps_num, T_steam); datetick('x','dd-mmm HH:MM');
ylabel('T_{steam} (°C)'); grid on;
hold on; plot(timestamps_num, Reliability,'r'); legend('T\steam','Reliability');

figure('Name','P_drum and Reliability');
plot(timestamps_num, P_drum); datetick('x','dd-mmm HH:MM'); ylabel('P\drum
(MPa)'); grid on;
hold on; plot(timestamps_num, Reliability,'r'); legend('P\drum','Reliability');

figure('Name','Water Level and Reliability');
plot(timestamps_num, Level); datetick('x','dd-mmm HH:MM'); ylabel('Level (%)');
grid on;
hold on; plot(timestamps_num, Reliability,'r'); legend('Level','Reliability');

% 2) Histogram of Reliability

```

```

figure('Name','Histogram Reliability'); histogram(Reliability,20);
xlabel('Reliability (%)');

% 3) Критичні моменти
crit_idx = find(Reliability < 40);
if ~isempty(crit_idx)
    fprintf('Критичні індекси (Reliability < 40): %d випадків. Перший: %s\n',
length(crit_idx), datestr(timestamps_num(crit_idx(1))));
else
    fprintf('Критичних моментів не знайдено (Reliability < 40).\n');
end

%% ----- Збереження FIS -----
try
    writefis(fis,'BoilerReliability_sim_R2015');
    fprintf('FIS збережено у BoilerReliability_sim_R2015.fis\n');
catch
    warning('Не вдалося зберегти FIS через writefis.');
```

```

end

fprintf('Готово. Файли: sim_boiler_data.csv,
sim_boiler_data_with_reliability.csv\n');
```

Додаток С

Код програми для прогнозування аварійного стану роботи СПК

```

%% FuzzyExpert_LevelDrop_R2015.m
% Експертна нечітка система прогнозу настання аварії (зниження рівня) в
барабані котла

%% 1. Створення FIS (Mamdani)
fis = newfis('LevelDropPredictor','mamdani');

%% 2. Додавання вхідних змінних
% Вхід 1: Зміна витрати пари у відсотках від номіналу (%)
% Діапазон: -100 .. +200 (%), але можна адаптувати
fis = addvar(fis,'input','DeltaSteamPct',[-100 200]);

% Вхід 2: Зміна витрати підживлювальної води у відсотках від номіналу (%)
% Діапазон: -100 .. +200 (%)
fis = addvar(fis,'input','DeltaFeedPct',[-100 200]);

%% 3. Вихідна змінна: Ризик зниження рівня (0..100%)
fis = addvar(fis,'output','LevelDropRisk',[0 100]);

%% 4. Функції належності для DeltaSteamPct
% Low: значне падіння витрати пари (може бути рідкісним, але включає
negative change)
fis = addmf(fis,'input',1,'Low','trapmf',[-100 -100 -20 -5]);
% Normal: невеликі зміни +/-10%
fis = addmf(fis,'input',1,'Normal','trimf',[-10 0 10]);
% High: різке зростання витрати пари (інтенсивне паровідбор)
fis = addmf(fis,'input',1,'High','trapmf',[5 20 200 200]);

%% 5. Функції належності для DeltaFeedPct
% Slow: зниження подачі або затримка (ознака поломки)
fis = addmf(fis,'input',2,'Slow','trapmf',[-100 -100 -30 -5]);
% Normal: стабільна
fis = addmf(fis,'input',2,'Normal','trimf',[-10 0 10]);
% Fast: різке збільшення подачі (рідко)
fis = addmf(fis,'input',2,'Fast','trapmf',[5 30 200 200]);

%% 6. Функції належності для виходу LevelDropRisk
fis = addmf(fis,'output',1,'None','trimf',[0 10 30]);

```

```

fis = addmf(fis,'output',1,'Small','trimf',[20 45 70]);
fis = addmf(fis,'output',1,'Large','trimf',[60 80 100]);

```

```

%% 7. База правил (приклад)

```

```

% Формат: [steam_mf feed_mf leveldrop_mf weight op]

```

```

% op: 1 = AND, 2 = OR

```

```

rule1 = [3 1 1 1 2]; % IF Steam IS High OR Feed IS Slow THEN Risk =
Small/Medium

```

```

% але краще кілька правил для покриття логіки:

```

```

rule2 = [3 1 3 1 1]; % IF Steam IS High AND Feed IS Slow THEN Risk = Large
(аварія)

```

```

rule3 = [3 2 2 1 1]; % IF Steam IS High AND Feed IS Normal THEN Risk = Small
(потенційний ризик)

```

```

rule4 = [2 1 2 1 1]; % IF Steam IS Normal AND Feed IS Slow THEN Risk =
Small

```

```

rule5 = [1 2 1 1 1]; % IF Steam IS Low AND Feed IS Normal THEN Risk = None

```

```

rule6 = [2 2 1 1 1]; % IF both Normal -> None

```

```

rule7 = [1 1 2 1 1]; % IF Steam Low AND Feed Slow -> Small (може бути ризик
через нестачу пара? ту)

```

```

% Додаткові правила для більшої покритості:

```

```

rule8 = [3 3 2 1 1]; % IF Steam High AND Feed Fast -> Small (feed компенсує)

```

```

rule9 = [1 1 1 1 2]; % IF Steam Low OR Feed Slow -> None/Small (OR case)

```

```

ruleList = [rule1; rule2; rule3; rule4; rule5; rule6; rule7; rule8; rule9];

```

```

% Додаємо правила

```

```

fis = addrule(fis, ruleList);

```

```

%% 8. Параметри дефазифікації та метод агрегації (за замовчуванням)

```

```

% У старому API використовується defuzz_method 'centroid' за
замовчуванням, agg = max, rule implication min.

```

```

%% 9. Візуалізація поверхні (опціонально)

```

```

figure('Name','Surface: LevelDropRisk(DeltaSteam,DeltaFeed)');

```

```

gensurf(fis);

```

```

%% 10. Тестові приклади (практичні сценарії)

```

```

% Формат: [DeltaSteamPct , DeltaFeedPct]

```

```

testCases = [

```

```

    30, -40; % сильне зростання відбору пари + падіння подачі води -> аварія
(Large)

```

```

    25, 0; % висока пара, нормальна подача -> Small

```

```

    -20, 0; % падіння паровідбору, нормальна подача -> None

```

```

    10, -50; % помірно зростання пари + серйозний дефіцит подачі -> Large
    5, 5; % невеликі зміни -> None/Small
    50, 50; % дуже велике відбор пари але швидка подача -> Small
(компенсація)
];

fprintf('\nTest cases evaluation:\n');
for i=1:size(testCases,1)
    inVec = testCases(i,:);
    try
        outVal = evalfis(inVec, fis); % або evalfis(fis,inVec) в залежності від
підверсії
    catch
        outVal = evalfis(fis, inVec);
    end
    fprintf('DeltaSteam=%.1f%%, DeltaFeed=%.1f%% ->
LevelDropRisk=%.2f%%\n', inVec(1), inVec(2), outVal);
end

%% 11. Інтеграція з реальними сигналами
% У твоєму реальному кодi потрібно подавати сюди:
% DeltaSteamPct = 100*(currentSteamFlow - prevSteamFlow)/prevSteamFlow
% DeltaFeedPct = 100*(currentFeedFlow - prevFeedFlow)/prevFeedFlow
% Далі викликати evalfis i, якщо LevelDropRisk > threshold (наприклад 60),
сигналізувати аварійну тривогу.

%% 12. Збереження FIS
try
    writefis(fis,'LevelDropPredictor_R2015');
    fprintf('FIS збережено у LevelDropPredictor_R2015.fis\n');
catch
    warning('Не вдалося зберегти FIS через writefis у цій версії MATLAB.');
```