

УДК 004.5:004.67

DOI: 10.31653/1819-3293-2025-1-30-66-78

ARTICLE HISTORY

Received 11.04.2025

Accepted 07.05.2025

Михайленко Владислав Сергійович¹, Харченко Роман Юрійович²
Національний університет "Одеська морська академія"
vladmi hailen@gmail.com¹, romannn30@gmail.com²

Нечітка експертна система моніторингу технічного стану суднових дизелів

Vladislav Mykhailenko¹, Roman Kharchenko²
NU "Odessa Maritime Academy", Odessa, Ukraine
vladmi hailen@gmail.com¹, romannn30@gmail.com²

Fuzzy expert system for monitoring the technical condition of ships diesel engines

Резюме. Розглянуто процес розробки нечіткої експертної системи моніторингу технічного стану суднових дизельних двигунів. Запропонована система використовує базу знань і механізми нечіткої логіки для діагностики несправностей, що підвищує ефективність технічного обслуговування суднових енергетичних установок і забезпечує надійність їх експлуатації. Систему реалізовано в математичному пакеті Matlab (FLT) та хмарному середовищі Google Colab. За результатами експерименту представлено програмний код із відповідними рекомендаціями для оператора. Апробація розробленої системи підтвердила її ефективність і перспективність упровадження в системи моніторингу суднового енергетичного обладнання.

Summary. This publication discusses the development of a fuzzy expert system for monitoring the technical condition of marine diesel engines. The proposed system utilizes a knowledge base and fuzzy logic mechanisms to diagnose faults, thereby improving the efficiency of maintenance for marine power plants and ensuring operational reliability. The system is implemented using the Matlab (FLT) mathematical package and the Google Colab cloud environment. Based on the experimental results, the program code is presented along with corresponding recommendations for the system

operator. The testing of the developed system confirms its effectiveness and its potential for integration into marine power equipment monitoring systems.

Аналіз процесів експлуатації суднових енергетичних установок показує, що найчастіше відмова обладнання пов'язана з судновими дизельними агрегатами (СД) головних і допоміжних установок. При цьому 60 – 90 % всіх відмов припадає на дизелі і допоміжні системи, що їх обслуговують [1]. З представленого обсягу від 15 до 25 % припадало на судові дизель-генератори (СДГ) [2].

У зв'язку з цим аналіз сучасних наукових методів та алгоритмів діагностики параметрів СД є актуальним науковим завданням. В даний час у суднових системах контролю та моніторингу агрегатів СЕУ, зокрема компанії Kongsberg, використовується значна кількість спеціальних програмних засобів контролю та виведення повідомлень про аварійні ситуації [3]. Разом з тим, практика показує, що необхідно вдосконалення наявних та розробка нових практичних методів, які б забезпечували більш ефективний контроль та прогноз можливих ризиків виходу з ладу обладнання СД.

Одним із можливих наукових напрямів, що сприяють підвищенню якості процесів контролю та діагностики технічного стану СД, можна вважати запровадження експертних систем (ЕС), зокрема працюючих на основі теорії нечіткої логіки [4, 5]. Дані експертні системи успішно зарекомендували себе під час діагностики широкого ряду технічних систем. Головною відмінністю даних інтелектуальних систем є використання досвіду, знань та інтуїції експертів (технічних фахівців із ремонту та обслуговування СД).

Основна труднощі у створенні інтелектуальної ЕС для СД у тому, що експлуатація судового обладнання характеризується суттєвою невизначеністю. Це пов'язано характерними для морської експлуатації факторами: хитавиця, вплив людського фактора, необхідність здійснення маневрів і пов'язані з цим змінні режими навантаження роботи СД. Для визначення технічного стану елементів СД доцільним є застосування апарату нечіткої логіки, що дозволяє працювати з існуючою невизначеністю, неповнотою та нечіткістю інформації. Так, на думку ряду авторів [6 - 8] у моделі нечіткої експертної системи для визначення технічного стану СДГ входними змінними є опір ізоляції, повна потужність, температура обмотки статора, температура обмотки ротора, температура підшипника, вібрація генератора, зміна кольору вихлопних газів дизеля, зміна температури охолоджуючої води та тиску мастила у дизелі, збільшення подачі палива на базових режимах.

Виходом параметром є технічний стан СД та його підсистем у вигляді нечітких множин ("не задовільний", "задовільний", "добрий", "дуже добрий") та рекомендації щодо подальшої експлуатації та обслуговування.

Умови експлуатації суднових дизелів, на відміну стаціонарних, характеризуються нестабільністю. Це пов'язано з низкою факторів, характерних для морської експлуатації: бортова, кильова та вертикальна хитація; змінні вологість, температура та тиск навколишнього середовища; необхідність здійснення маневрів та пов'язані з цим змінні навантажувальні режими; частий перехід різні сорти палива: від легкого дизельного до важкого; вплив людського чинника. Враховуючи об'єктивно існуючу невизначеність, неповноту та нечіткість інформації про об'єкт при розробці бази знань та механізмів виведення експертних систем, доцільно, на думку авторів, використовувати апарат нечіткої логіки, що дозволяє об'єктивно оцінити технічний стан та більш обґрунтовано приймати рішення щодо управління ремонтом суднового обладнання (рис. 1).

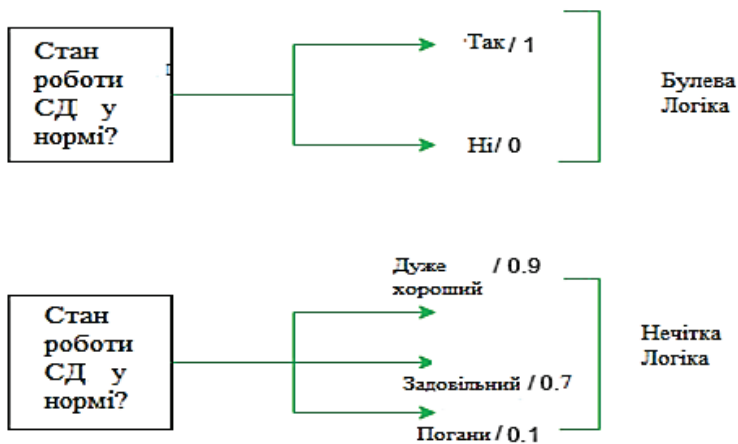


Рис. 1. Порівняння нечіткої логіки з булевою

Розробка нечіткої експертної системи

Архітектура роботи системи нечіткої логіки має наступні частини (рис. 2).

1. База ПРАВИЛ: містить набір правил та умови, надані експертами для управління системою прийняття рішень на основі лінгвістичної інформації. Останні розробки в теорії нечітких теорій пропонують

кілька ефективних методів для проектування та настройки нечітких контролерів. Більшість із цих розробок зменшують кількість нечітких правил.

2. Фази́фікація: використовується для перетворення входів, тобто чітких чисел, в нечіткі набори.

3. Блок Виводу: визначає ступінь узгодження поточного нечіткого вводу щодо кожного правила.

4. Дефази́фікація: використовується для перетворення нечітких множин у чітке значення. Доступно декілька методів дефази́фікації, і найкращий із них використовується із спеціальною експертною системою для зменшення помилки (рис. 2).

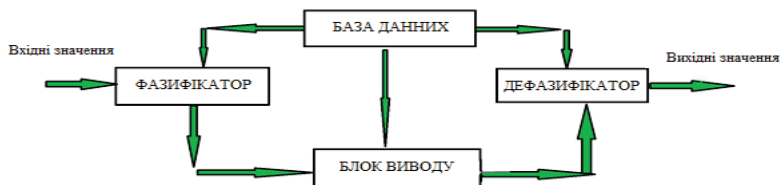


Рис. 2. Структура нечіткої експертної системи діагностики технічного стану СД

З урахуванням вищесказаного за допомогою Fuzzy Logic Toolbox пакета програм MATLAB була складена система підтримки прийняття рішень для операторів судна.

Етап розробки ЕС технічного стану елементів судового дизеля.

Для визначення інформаційної цінності параметрів роботи такого складного технічного об'єкта, як судовий дизель, може бути використаний критерій інформативності K_i , що визначається за виразом [9]:

$$K_i = I_x K_z,$$

де I_x - кількість інформації про стан двигуна, що визначається технічними параметрами дизеля; K_z - значущість (вага) параметра.

У табл. 1 наведено значення критерію інформативності для деяких судових дизелів. Наведені вихідні параметри за значеннями K_i можуть бути умовно поділені на три групи: високоінформативні $K_i = (1,0 \div 0,3) K_{i\text{макс}}$; середньої інформативності $K_i = (0,3 \div 0,03) K_{i\text{сер}}$; низької інформативності $K_i < 0,03 K_{i\text{низ}}$.

Основні контрольовані параметри СД, які використовуються для аналізу у ЕС представлені в табл. 1

Таблиця 1

Параметри суднового дизеля MAN B&W 8L28/32 з високою інформативністю [9]

Параметри	Межі роботи параметрів
Тиск води контуру прісного охолодження	не нижче 2,4 бар
Тиск мастила	не нижче 3,5 бар
Тиск палива	не нижче 3,0 бар
Температура води контуру високої температури	не більше 90 ° С
Температура мастила дизель-генератора	не більше 80 ° С
Температура підшипників колінчатого вала	до 100 ° С
Різниця температури вихлопних газів щодо встановленої	не більше $\pm 50^{\circ}\text{C}$
Тиск пускового повітря	не нижче 15 бар

Етап фазифікації вхідних та вихідних параметрів у програмі Fuzzy Logic Toolbox пакету MATLAB (версія online) (рис. 3) [9].

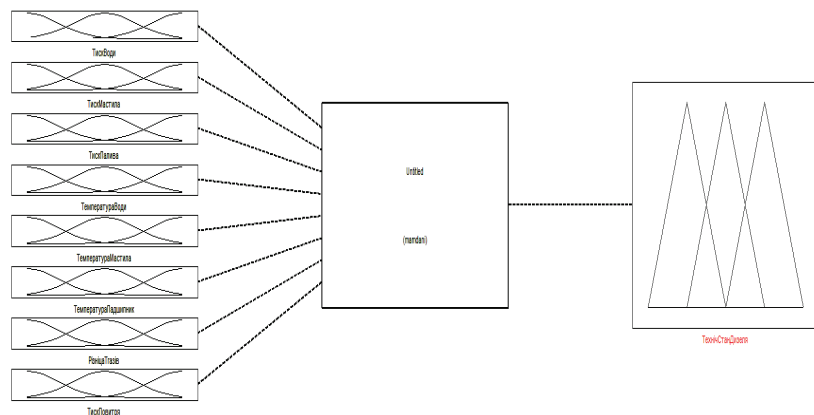


Рис. 3. Вікно інтерфейсу розробки ЕС діагностики технічного стану СД

При формуванні виведення були задані такі відносини щодо загального стану дизеля:

від 0 до 25 % – рівень технічного стану дизеля "дуже низький". Потрібно виведення обладнання з експлуатації для запобігання аварії;

від 25 до 50 % – рівень технічного стану "низький". Потрібне технічне обслуговування (заміна підшипників, перевірка стану паливної апаратури і т.д.), рекомендується тимчасове виведення обладнання з ладу;

від 50 до 75 % – рівень "нормальний". Потрібне технічне обслуговування (ревізія, огляд, перевірка стану вузлів) без виведення ладу;

від 75 до 85 % – рівень технічного стану «вищий за нормальний». Через певний інтервал часу роботи потрібна обробка нових даних, отриманих під час додаткової діагностики.

від 85 до 100 % – рівень "дуже високий". Дизель знаходиться в робочому стані, жодних додаткових дій, крім запису показань системи, не потрібно.

Також, для отримання більш достовірної інформації рекомендується проведення позарегламентних вимірювань. Це пов'язано з визначенням можливих неконтрольованих, в момент попереднього виміру, несправностей, які опосередковано впливають на значення основних контрольованих параметрів;

Етапи процесу вибору типу функцій належності та інтервалу вимірювань контрольованих параметрів роботи суднового дизеля (вхідних та вихідного ЕС) показані на рис. 4 - 10.

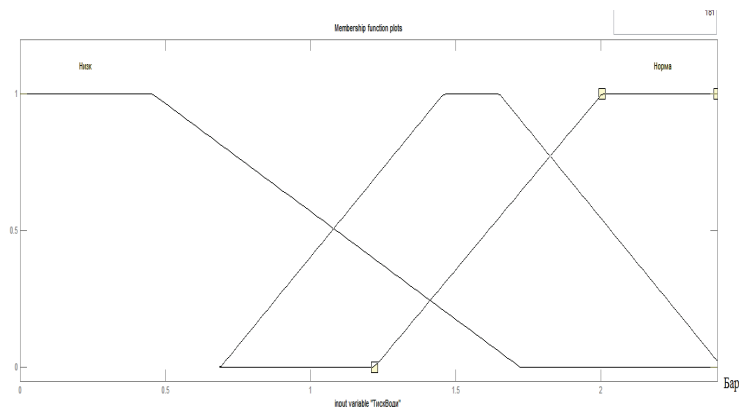


Рис. 4. Функції належності змінної "Тиск води на охолодження"

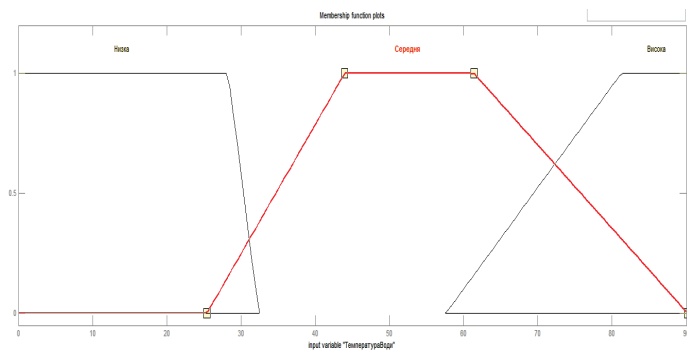


Рис. 5. Функції належності вхідного параметра "Температура води, що охолоджує дизель"

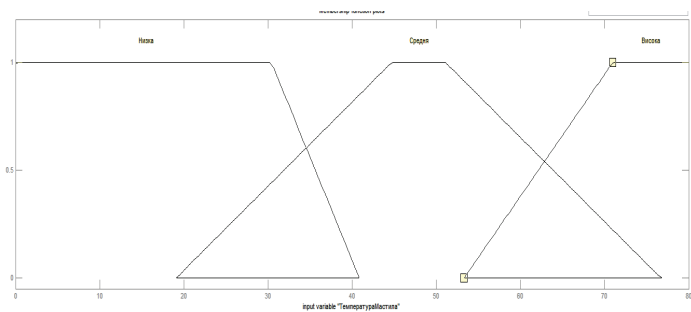


Рис. 6. Функції належності вхідного параметра "Температура мастила"

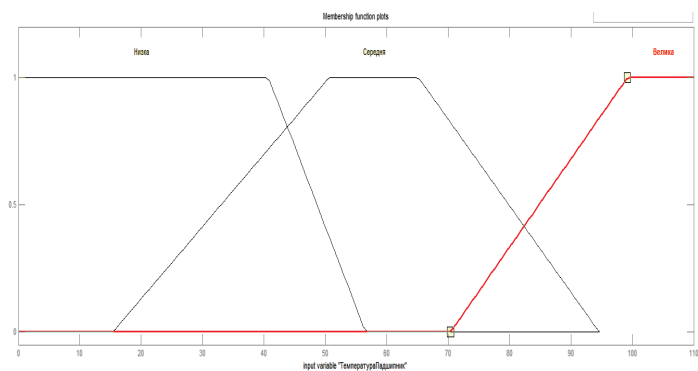


Рис. 7. Функції належності вхідного параметра "Температура підшипників на валу"

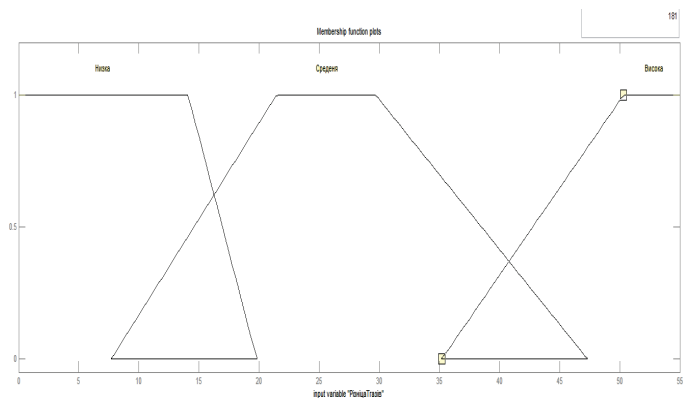


Рис. 8. Функції належності вхідного параметра "Різниця температури вихідних газів від норми"

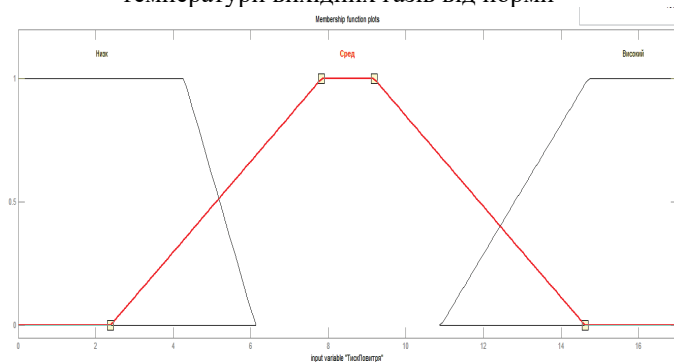


Рис. 9. Функції належності вхідного параметра "Тиск повітря"

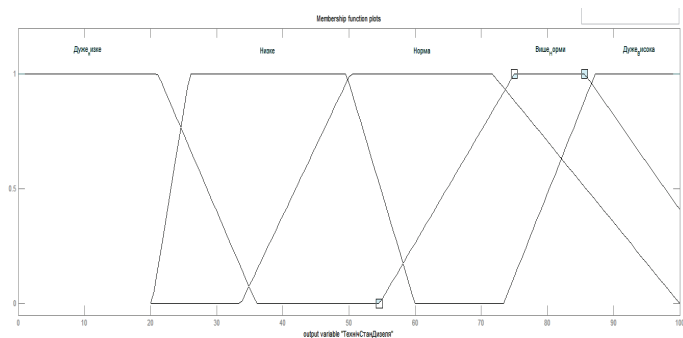


Рис. 10. Функції належності вхідного параметра "Технічний стан дизеля, Т"

Розробка бази знань ЕС показана на рис. 11.

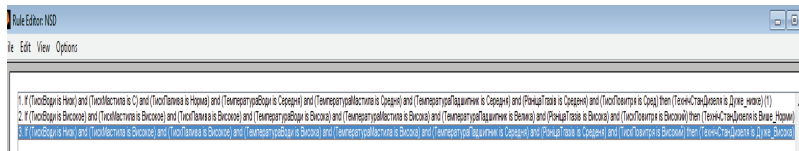


Рис. 11. Етап розробки бази знань НЕС виду "Умова № 1"
..I...."Умова ... № 8" ТО "Висновок про технічний стан суднового
дизеля

Правило-орієнтована база знань включає в себе досвід та знання спеціаліста з діагностики роботи СД. Правила складаються із логічних висновків виду ЯКЩО "Умова" ТО "Висновок". Зв'язок між вхідними умовами здійснюється за рахунок логічної операції - кон'юнкції.

Демонстрація роботи ЕС та оцінки технічного стану дизеля представлені на рис. 12 - 14. Перевірка роботи ЕС здійснювалася за умови варіювання контрольованих параметрів (моделювання різних значень контрольованих параметрів які відображають стан роботи СД).



Рис. 12. Показники технічного стану дизеля $T = 80\%$ (рівень роботи СД вище за нормальний)

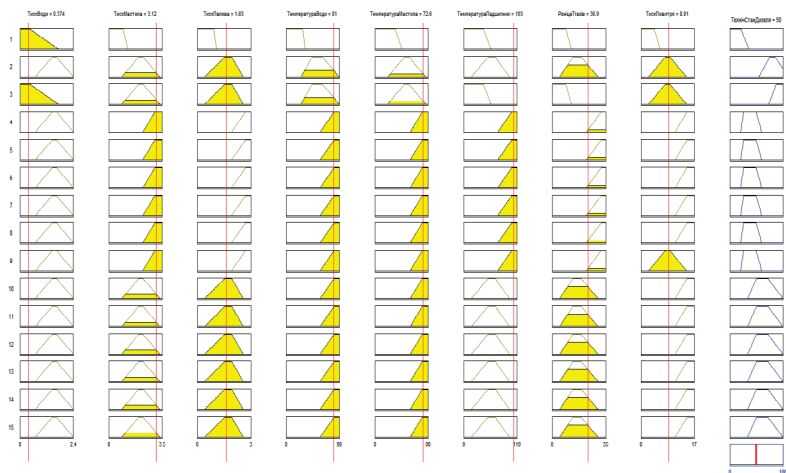


Рис. 13. Показники технічного стану дизеля $T = 50\%$ (рівень технічного стану низький). Потрібне технічне обслуговування

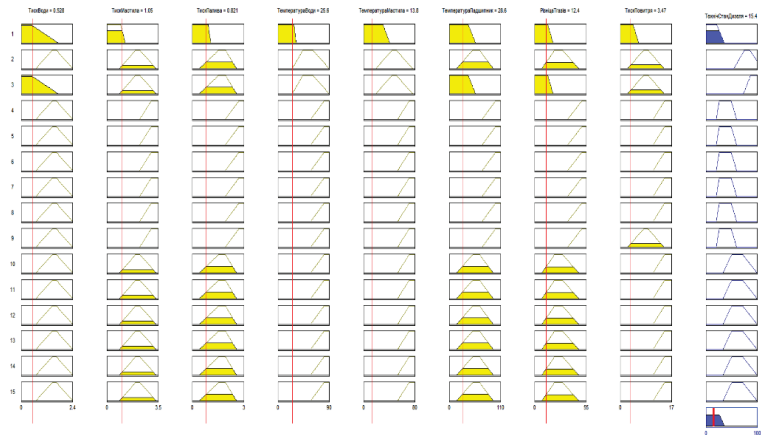
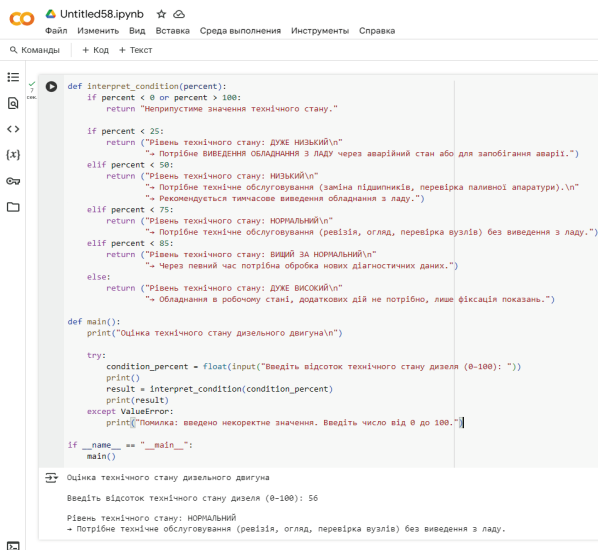


Рис. 14. Показники технічного стану дизеля $T = 15,4\%$ рівень технічного стану дизеля дуже низький. Потребує зупинки та ремонту

Для видачі рекомендацій оператору щодо подальшої дії в середовище Google Colab мовою Python була розроблена додаткова ЕС (рис. 15).



```

def interpret_condition(percent):
    if percent < 0 or percent > 100:
        return "Напрямуйте значення технічного стану."

    if percent < 25:
        return ("Рівень технічного стану: ДУЖЕ НИЗЬКИЙ\n"
                "- Потрібне ВИВЕДЕННЯ обладнання з ладу через аварійний стан або для запобігання аварії.")
    elif percent < 50:
        return ("Рівень технічного стану: НИЗЬКИЙ\n"
                "- Потрібне технічне обслуговування (заміна підшипників, перевірка паливної апаратури).\n"
                "- Рекомендується тимчасове виведення обладнання з ладу.")
    elif percent < 75:
        return ("Рівень технічного стану: НОРМАЛЬНИЙ\n"
                "- Потрібне технічне обслуговування (ревізія, огляд, перевірка вузлів) без виведення з ладу.")
    elif percent < 85:
        return ("Рівень технічного стану: ВИЩИЙ ЗА НОРМАЛЬНИЙ\n"
                "- Через певний час потрібна обробка нових діагностичних даних.")
    else:
        return ("Рівень технічного стану: ДУЖЕ ВИСОКИЙ\n"
                "- Обладнання в робочому стані, додаткових дій не потрібно, лише фіксація показань.")

def main():
    print("Оцінка технічного стану дизельного двигуна")

    try:
        condition_percent = float(input("Введіть відсоток технічного стану дизеля (0-100): "))
        print()
        result = interpret_condition(condition_percent)
        print(result)
    except ValueError:
        print("Помилка: введено некоректне значення. Введіть число від 0 до 100.")

if __name__ == "__main__":
    main()

```

Оцінка технічного стану дизельного двигуна

Введіть відсоток технічного стану дизеля (0-100): 56

Рівень технічного стану: НОРМАЛЬНИЙ
 - Потрібне технічне обслуговування (ревізія, огляд, перевірка вузлів) без виведення з ладу.

Рис. 15. Програмний код та рекомендації оператора

Висновки

Демонстрування роботи ЕС показало ефективний процес визначення показників працездатності дизеля та своєчасну підтримку у прийнятті рішень електромеханіком щодо подальшого обслуговування та експлуатації СД.

При цьому можна зазначити, що робота ЕС може відбуватися в режимі безпосереднього виміру технічних показників температури, тиску та інших параметрів дизеля. Інформація на станцію управління та моніторингу запропонованої експертною системою надходить від датчиків через контролер. Контролер надсилає інформацію на робочу станцію оператора експертною системою, яка здійснює розрахунок ступеня працездатності та робить рекомендації щодо подальшої експлуатації дизельного обладнання.

Таким чином, впровадження експертних систем у підсистеми моніторингу та діагностування технічного стану суднових дизельних агрегатів дозволяє своєчасно приймати вірні та своєчасні рішення при плануванні ремонту та проводити технічне обслуговування без аварійних ситуацій.

ЛІТЕРАТУРА
REFERENCES

1. Шостак, В. П. Системи суднових дизельних установок: навчальний посібник – Миколаїв: НУК, 2021. - 128 с.
2. Полянский, С. К., Жерновий, А. С. Лесько, В. І., Тінченко, С. Х. Діагностика і технічне обслуговування дизелів. – К.: Либідь, 1995. – 312 с.
3. Kongsberg Maritime. Technologies for sustainable oceans [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <https://www.kongsberg.com/maritime> (дата звернення: 12.05.2025).
4. Steklov, A.S. Neuro-fuzzy model for diagnosing the technical condition of a synchronous generator / A.S. Steklov, D.S. Podkovyrin // Chief power engineer. - 2015. - № 11–12. - P. 34 – 42.
5. Mamdani, E. H. Application of fuzzy algorithms for control of simple dynamic plant / E. H. Mamdani // Proc. Inst. Elect. Eng. Contr. Sci. – 1974. - Vol. 121. – P. 1585 – 1588.
6. Россомеха, О. І. Концептуальна модель системи технічного обслуговування і ремонту складних технічних систем // Розвиток транспорту – 2020. - №1(6). – С. 56 – 70.
7. Porteiro, J.; Collazo, J.; Patiño, D.; Míguez, J.L. Diesel engine condition monitoring using a multi-net neural network system with nonintrusive sensors. Appl. Ther. Eng. – 2011. – 31. – P. 4097 – 4105.
8. Mikhailenko, V. S., Kharchenko, R. Y., Leshchenko, V. V. Fuzzy method of approximating values of parameters of dynamic models of ship boilers // Автоматизація суднових технічних засобів: наук.-техн. зб. – 2023. – Вип. 28. – Одеса: НУ "ОМА". – С. 121 – 131.
9. Fuzzy logic based expert system for diesel engine oil analysis diagnosis [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <https://www.researchgate.net/publication/233644748> (дата звернення: 14.05.2025).

Abstract. The article presents the development of a fuzzy expert system for monitoring the technical condition of a MAN marine diesel engine using modern tools such as MATLAB (Fuzzy Logic Toolbox) and Python in the Google Colab environment. The aim of the study is to create an intelligent tool that ensures timely detection of deviations in engine operation based on the analysis of control parameters. The system is based on fuzzy logic, which allows for the consideration of uncertainty and vagueness in expert assessments of equipment condition. The core of the system consists of a knowledge base developed with the participation of marine engineering

specialists and a fuzzy inference mechanism that generates recommendations for the operator.

The design process incorporated key control parameters of the MAN marine diesel engine: fresh water cooling circuit pressure, lube oil pressure, fuel pressure, high-temperature water circuit temperature, diesel generator oil temperature, crankshaft bearing temperature, exhaust gas temperature deviation from the set value, and starting air pressure. Each parameter is assigned an informativeness coefficient that is considered in the diagnostic conclusions.

The system was implemented in two software environments. In MATLAB, the fuzzy logic model was built using the Fuzzy Logic Toolbox, including input variables, rules, membership functions, and output recommendations. In Google Colab, a Python script was created to process input data from sensors, calculate signal informativeness coefficients, and visualize results. This approach ensures flexibility, scalability, and practical applicability of the system.

The developed expert system is capable of real-time data analysis and provides clear recommendations regarding the technical condition of the marine diesel engine. It contributes to improved maintenance efficiency, reduced downtime, and enhanced reliability of ship power plants.