

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНА СИСТЕМА ДІАГНОСТИКИ ТА МОНІТОРИНГУ ГІБРИДНОГО СУДНОВОГО ТУРБОКОМПРЕСОРА З НЕЧІТКОЮ МОДЕЛЛЮ

Лебеденко Ю. О., к.т.н., доцент, доцент кафедри інформаційних та комп'ютерних технологій Київського національного університету технологій та дизайну, м. Київ, Україна, e-mail: lebedenko.yo@knu.ua, ORCID: 0000-0002-1352-9240;

Тимофеев К. В., к.т.н., доцент, доцент кафедри експлуатації суднового електрообладнання і засобів автоматики, Херсонська державна морська академія, м. Херсон, Україна, e-mail: kvtimofoev2013@gmail.com, ORCID: 0000-0002-8668-6159;

Вороненко С. В., к.т.н., доцент кафедри експлуатації суднового електрообладнання і засобів автоматики Херсонської державної морської академії, м. Херсон, Україна, e-mail: vr.sergey@ukr.net, ORCID: 0000-0002-3880-9556;

Бігун С. В., аспірант кафедри експлуатації суднового електрообладнання і засобів автоматики, Херсонська державна морська академія, м. Херсон, Україна, e-mail: bigunsergej4@gmail.com, ORCID: 0009-0007-6385-3296.

Стаття присвячена актуальній задачі підвищення ефективності, надійності та безпеки експлуатації суднових енергетичних установок (СЕУ) через удосконалення систем моніторингу та діагностики ключового обладнання. Розглянуто концепцію та структуру інтелектуальної інформаційно-вимірювальної системи (ІВС) для комплексного моніторингу технічного стану та діагностики гібридних суднових турбокомпресорів (ГТК), які поєднують енергію відпрацьованих газів і додатковий електричний привід, однак їх складна конструкція та жорсткі умови експлуатації вимагають передових діагностичних підходів.

Запропонована ІВС функціонує на основі безперервного аналізу багатопараметричних даних, отриманих у реальному часі від комплексу датчиків, що фіксують ключові робочі параметри ГТК: температуру газів, тиск наддування, вібраційні характеристики, частоту обертання ротора, а також параметри роботи електричної машини. Система передбачає використання інтелектуальної обробки інформації, з акцентом на алгоритми нечіткої логіки. Такий вибір обґрунтований здатністю нечітких систем ефективно обробляти неточні, неповні або якісно виражені дані та формалізувати експертні знання інженерів-механіків, що забезпечує адекватну оцінку стану.

Ключовою функцією ІВС є високоточна та гнучка діагностика технічного стану турбокомпресора. Система оперативно розпізнає та класифікує три основні режими роботи: стабільний нормальний; стан із потенційним відхиленням, що потребує превентивних заходів; та критично несправний стан, що вимагає негайного втручання. Залежно від діагнозу, система формує інформаційну підтримку для прийняття рішень щодо коригування параметрів керування, зокрема оптимізації роботи асинхронної машини ГТК для підтримки ефективного наддування, та для активації механізмів аварійного регулювання.

Впровадження розробленої інтелектуальної системи сприятиме підвищенню ефективності турбокомпресора, забезпечить раннє виявлення та прогнозування несправностей, оптимізує технічне обслуговування та керування. Це має важливе практичне значення для підвищення надійності, економічності та продуктивності суднових двигунів у різних експлуатаційних умовах, а також для загального підвищення безпеки судноплавства.

Ключові слова: суднова енергетична установка; гібридний турбокомпресор; інформаційно-вимірювальна система; нечітка логіка; адаптивне керування; діагностика стану; моніторинг.

DOI: 10.33815/2313-4763.2025.1.30.031-044

Вступ. Сучасні суднові енергетичні системи спрямовані на підвищення ефективності та надійності, де ключову роль відіграє оптимізація наддування двигунів внутрішнього згоряння (ДВЗ). Ефективне керування турбокомпресорами, особливо гібридного типу з асинхронною машиною, забезпечує краще згоряння палива, збільшує потужність та знижує викиди.

Системи керування турбокомпресорними установками (ТКУ) використовують обертові частотні перетворювачі для адаптації роботи компресора до змінних умов, таких як

навантаження двигуна, температура газів та параметри навколишнього середовища, підтримуючи оптимальний тиск і витрату повітря [1].

Інформаційно-вимірювальні частини є критично важливими, забезпечуючи передачу даних у керуючий модуль та виконуючи первинну діагностику. Збір даних з датчиків тиску, температури, обертів та навантаження дозволяє прогнозувати несправності та приймати управлінські рішення.

Інтелектуальна обробка інформації за допомогою нейронних мереж та нечіткої логіки розширює можливості цих систем, дозволяючи оперативного коригувати параметри та підвищувати надійність турбокомпресора. Такі системи самостійно адаптуються до змін, забезпечуючи стабільну роботу двигуна.

Постановка проблеми. Оптимізація процесів наддування двигунів внутрішнього згоряння є ключовим напрямком для задоволення вимог щодо ефективності, екологічності та надійності. Турбокомпресори гібридного типу, що використовують енергію викидних газів та додатковий привід від асинхронної машини, є передовим рішенням у цій галузі [2]. Однак, їхня складна природа вимагає високоточних та адаптивних систем керування.

Відомі системи керування ТКУ забезпечують регулювання параметрів наддування за допомогою обертового частотного перетворювача, який дозволяє адаптувати роботу компресора до змінних експлуатаційних умов, таких як навантаження двигуна, температура вихлопних газів і баланс енергоспоживання. Проте, складність взаємодії між турбіною, компресором та асинхронною машиною, а також вплив динамічних змін у судовій електроенергетичній системі, створюють значні виклики для забезпечення оптимальної та стабільної роботи.

Попри наявність розгалужених штатних систем контролю, їх функціонал здебільшого обмежений реєстрацією параметрів та аварійною сигналізацією при виході за жорстко встановлені межі.

Існуючі інформаційно-вимірювальні системи, хоч і забезпечують передачу параметрів до керуючого модуля та виконують базову діагностику, часто стикаються з обмеженнями щодо глибокого аналізу даних та прогнозування несправностей. Застосування інтелектуальної обробки інформації, зокрема нейронних мереж та алгоритмів нечіткої логіки, відкриває нові можливості для підвищення надійності та ефективності роботи турбокомпресора шляхом прогнозування потенційних відхилень та оперативного коригування робочих параметрів.

Таким чином, розробка нових підходів до створення інформаційно-вимірювальних систем турбокомпресорних установок, удосконалення методів моніторингу, аналізу та адаптивного керування є актуальним науково-технічним завданням. Розв'язання цієї проблеми сприятиме підвищенню ефективності судових двигунів, забезпеченню їх стабільної роботи в широкому діапазоні експлуатаційних умов, мінімізації часу простою та зниженню експлуатаційних витрат.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Сучасний морський транспорт прагне підвищити ефективність судових енергетичних установок (СЕУ) шляхом оптимізації енергоспоживання та автоматизації. Ключову роль у цьому відіграють системи турбонаддування, особливо гібридні турбокомпресори (ГТК). ГТК складаються з компресора, турбіни та асинхронної машини, яка або додає обертальний момент компресора (двигунний режим), або відбирає надлишкову потужність турбіни (генераторний режим) [3].

Турбіна, з'єднана з випускним колектором, та компресор, підключений до впускного колектора головного двигуна, забезпечують перерозподіл енергії. Компресор використовує енергію вихлопних газів, що обертають турбінне колесо. Повітря на вході компресора очищується, а на виході – охолоджується, що гарантує ефективну роботу ГТК за різних умов. Таким чином, ГТК функціонує у двох режимах, забезпечуючи оптимальне використання енергії. Дослідження показують, що такі системи можуть значно підвищити ККД двигунів – Mitsubishi повідомляє про можливість генерування до 250 кВт електроенергії, а Bowman

Power Group звітує про зниження витрати палива на 7% та збільшення потужності на 15% [4].

Система керування гібридним турбокомпресором (рис. 1) аналізує параметри двигуна: швидкість ω_D , температуру викидних газів T_G , рівень наддування p) та оптимізує режим роботи, використовуючи частотний перетворювач для регулювання частоти обертання асинхронної машини [5].

Додатковим фактором, що впливає на режим роботи турбокомпресора, є баланс електроенергетичної системи судна P_C . Коригування параметрів регулятора здійснюється на основі поточного рівня виробленої і спожитої потужності. Окрім цього, система враховує змінні експлуатаційні умови, що дозволяє забезпечити гнучке налаштування режимів роботи.

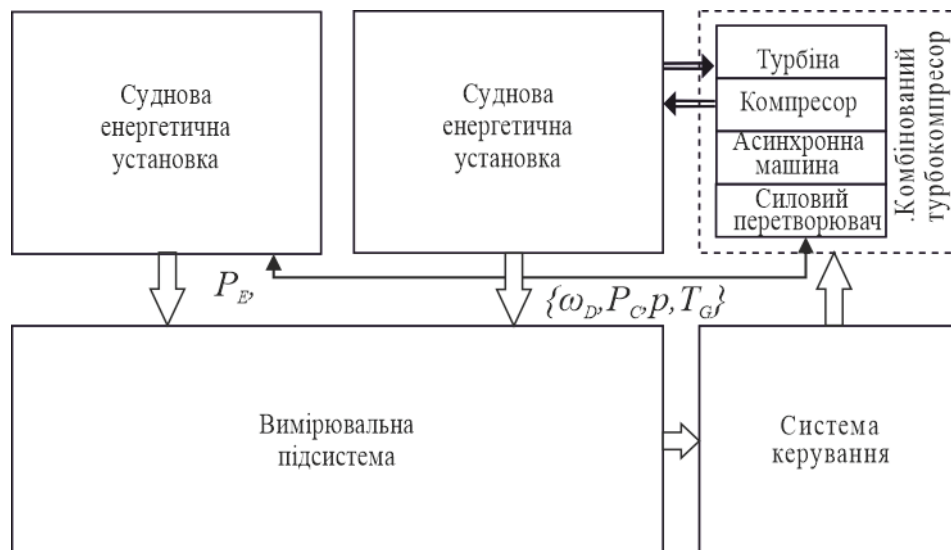


Рисунок 1 – Структурна схема системи гібридним турбокомпресором

Експлуатація суднових турбокомпресорів незмінно відбувається в екстремально складних умовах, що генерують значні та різнопланові навантаження на всі конструктивні елементи системи [6]. Зокрема, турбінна частина функціонує в умовах надзвичайно високих температур робочого середовища, які можуть регулярно сягати 600–700°C, а інколи й перевищувати ці показники. Такі температурні режими призводять до виникнення значних термічних напружень у металі, спричинених циклічним нагріванням та охолодженням, що неминуче веде до поступового термічного зношування матеріалів, втрати їх міцнісних характеристик та потенційної повзучості. Додатково, інтенсивні механічні навантаження, включаючи значні відцентрові сили, що виникають під час обертання ротора з високою швидкістю, створюють постійний ризик пластичної деформації та втоми окремих прецизійних компонентів, особливо це стосується лопаткового апарату та самого ротора.

Крім термічних та механічних впливів, судновим турбокомпресорам доводиться постійно контактувати з високоагресивним корозійним середовищем. Викидні гази головного суднового двигуна містять різноманітні хімічно активні сполуки, такі як оксиди сірки та ванадію, які утворюються при згорянні важких сортів палива, і здатні інтенсивно руйнувати металеві поверхні. Процеси ерозії, спричинені твердими частками сажі та недогару, а також високотемпературна газова корозія найбільш інтенсивно проявляються на робочих та напрямних лопатках турбіни, які безперервно піддаються дії цих агресивних газів. Окрім корозійно-ерозійного зносу, важливим дестабілізаційним фактором є значні вібраційні навантаження. Вони можуть бути спричинені не лише нестабільною роботою самого двигуна чи нерівномірним розподілом потоку газів через турбіну, але й зовнішніми джерелами, такими як вібрації від гребного гвинта чи корпусу судна. Тривалий вплив таких вібрацій здатен викликати порушення прецизійного балансу ротора, що, у свою чергу, може призвести до значного зниження ефективності роботи компресорної частини, прискореного зносу та передчасного виходу з ладу підшипникових вузлів.

Ще однією з ключових експлуатаційних проблем турбокомпресорів є прогресивне забруднення їхньої проточної частини. Викидні гази, навіть після систем очищення, містять певну кількість твердих частинок – сажі, золи, продуктів неповного згоряння палива та мастила. Ці частинки поступово осідають та накопичуються на внутрішніх поверхнях компонентів, таких як лопатки компресора, дифузор та сопловий апарат турбіни. Такі відкладення змінюють аеродинамічні характеристики профілів, зменшують ефективну пропускну здатність каналів та негативно впливають на загальні робочі характеристики установки, призводячи до зниження ККД та збільшення витрат палива. Окрім цього, з часом можливі порушення герметичності ущільнень ротора, що можуть спричинити неконтрольовані витоки робочого тіла (повітря або газів), втрату тиску наддування, потрапляння мастила у проточну частину, і як наслідок – до подальшого зниження ефективності турбокомпресора та навіть його серйозного пошкодження.

Одним із основних викликів у забезпеченні ефективної та надійної роботи суднових гібридних турбокомпресорів є також необхідність постійного врахування та адаптації до широкого спектра змінних умов експлуатації. До таких умов належать не лише динамічне навантаження головного двигуна, але й загальний баланс суднової електроенергетичної системи, а також параметри навколишнього середовища, такі як температура, тиск і вологість повітря на вході в компресор. Тому сучасні системи керування повинні володіти розширеними можливостями, включаючи здатність до прогнозування розвитку потенційних несправностей, швидкого реагування на позаштатні ситуації та гнучкого адаптивного налаштування робочих параметрів ТКУ. Водночас аналіз літературних джерел показує, що більшість чинних систем зосереджені на керуванні, тоді як задачі глибокої інтелектуальної діагностики та прогнозування технічного стану залишаються менш дослідженими [7]. Широке використання сучасних технологій контролю, зокрема розгалужених сенсорних систем для безперервної оцінки ключових параметрів, таких як температура компонентів, рівні вібрацій у різних точках, тиск повітря та газів, електричні параметри асинхронної машини дозволяє значно підвищити інформативність системи керування, надійність роботи самої установки та мінімізувати ризики виникнення аварійних несправностей. Завдяки таким комплексним підходам, що поєднують точний моніторинг та інтелектуальне керування, експлуатація турбокомпресорів стає більш ефективною, економічною та довговічною, що є критично важливим для забезпечення конкурентоспроможності та безпеки морського транспорту.

Традиційні методи діагностування, які часто застосовуються в інженерних системах, зазвичай базуються на чітких, бінарних критеріях та жорстко визначених порогових значеннях, що розмежовують стани «норма» та «несправність». Однак, для такого складного та динамічного об'єкта, як судновий турбокомпресор, подібний підхід виявляється недостатньо гнучким та адекватним, оскільки не враховує плавність деградаційних процесів. У реальних умовах експлуатації технічний стан ТГУ характеризується низкою особливостей, що ускладнюють застосування класичних детермінованих моделей:

1. Поступовий розвиток дефектів: Більшість несправностей у турбокомпресорах (наприклад, знос підшипників, забруднення лопаток, утворення нагару) розвиваються не миттєво, а поступово. Технічний стан плавно переходить від ідеального до аварійного через низку проміжних, частково деградованих станів, що погано описуються бінарною логікою. Чітко визначити момент переходу від «ще нормального» до «вже несправного» стану часто буває неможливо.

2. Взаємний вплив різних параметрів: Робочі параметри ТГУ (температури, тиски, вібрації, оберти тощо) тісно взаємопов'язані. Зміна одного параметра часто спричиняє ланцюгову реакцію змін інших, і не завжди ця залежність є лінійною чи легко формалізованою, що робить ізольовану порогову оцінку окремих показників малоефективною.

3. Невизначеність граничних значень: Номінальні та гранично допустимі значення робочих параметрів можуть мати певні допуски, залежати від умов навколишнього середовища (температура та вологість повітря), режиму роботи двигуна, якості палива та мастильних матеріалів. Встановлення універсальних «чітких» меж для всіх можливих умов є складним завданням, яке часто призводить або до помилкових спрацьовувань, або до пропуску зароджуваних дефектів.

4. Суб'єктивність експертних оцінок: Значна частина знань про діагностику ТГУ накопичена у вигляді досвіду кваліфікованих інженерів-механіків. Ці знання часто мають якісний, описовий характер і важко піддаються строгій математичній формалізації в рамках традиційних логічних систем.

Техніка нечіткої логіки надає потужний математичний апарат, що дозволяє формально описати та врахувати вищезазначені типи невизначеностей, властиві складним технічним системам. Вона оперує поняттям ступеня належності до певної множини, а не лише бінарними значеннями, що дає змогу моделювати плавні переходи між станами, обробляти неточну та якісну інформацію та приймати обґрунтовані рішення в умовах неповної або нечіткої вхідної інформації, забезпечуючи таким чином більш адекватну, гнучку та реалістичну оцінку фактичного технічного стану турбокомпресора.

Аналіз актуальних наукових публікацій підтверджує значну перспективність інтелектуальних методів у діагностиці складного промислового обладнання. Є рішення для діагностики турбокомпресорних установок, спрямовані на виявлення несправностей у системах мінерального мастила турбогенераторів на плавучих видобувних платформах [8]. В основі таких діагностичних моделей лежить поєднання глибоких експертних знань, формалізованих через аналіз видів, наслідків та критичності відмов, з реальними експлуатаційними даними, отриманими від бортових датчиків.

Такий підхід демонструє високу ефективність діагностики навіть за умов дефіциту історичних даних про відмови, що є типовим для промислових систем і ускладнює навчання традиційних моделей машинного навчання. Нечіткі логічні системи забезпечують точну класифікацію несправностей та нормального функціонування, успішно виявляючи як аномалії, так і штатний стан. Важливою перевагою є можливість прямої інкорпорації знань експертів у модель, що робить її не лише точною, але й інтерпретованою для інженерного персоналу.

Водночас адаптація таких моделей до інших підсистем турбогенераторів або до складніших гібридних турбокомпресорів з інтенсивною взаємодією компонентів вимагає додаткових досліджень. Також актуальною залишається проблема вдосконалення моделей для ефективної діагностики швидкоплинних перехідних процесів та тимчасових розбіжностей у показаннях датчиків [9].

Мета та задачі дослідження. Метою дослідження є розробка та вдосконалення інформаційно-вимірювальної системи керування гібридними турбокомпресорами суднових двигунів шляхом інтеграції адаптивних інтелектуальних методів моніторингу та діагностики для підвищення ефективності, надійності та забезпечення стабільної роботи у змінних експлуатаційних умовах.

Виклад основного матеріалу. Сучасні системи керування турбокомпресорами суднових двигунів потребують високоточної інформаційно-вимірювальної частини, яка забезпечує не лише контроль робочих параметрів, а й діагностику стану обладнання. Структурна схема інформаційно-вимірювальної системи моніторингу стану турбокомпресорної установки наведена на рис. 2.

Основною задачею системи є підтримка ефективного наддування двигуна шляхом комбінованої роботи турбіни та асинхронної машини. Оскільки керування здійснюється на основі складних взаємозв'язків між параметрами двигуна, важливу роль відіграє безперервний моніторинг таких величин, як тиск у впускному колекторі, температура

вихлопних газів, частота обертання компресора та навантаження двигуна. Дані параметри визначаються через систему датчиків, інформація з яких надходить до модуля керування.

Пропонована інтелектуальна інформаційно-вимірювальна підсистема (ІВП) є багатокомпонентним рішенням, спроектованим для всебічного моніторингу, глибокої діагностики технічного стану та реалізації адаптивного керування комбінованими судновими турбокомпресорними установками (ТГУ).

Центральним елементом є блок збору даних, що відповідає за оперативне та синхронізоване отримання вичерпної інформації про параметри роботи ТГУ.

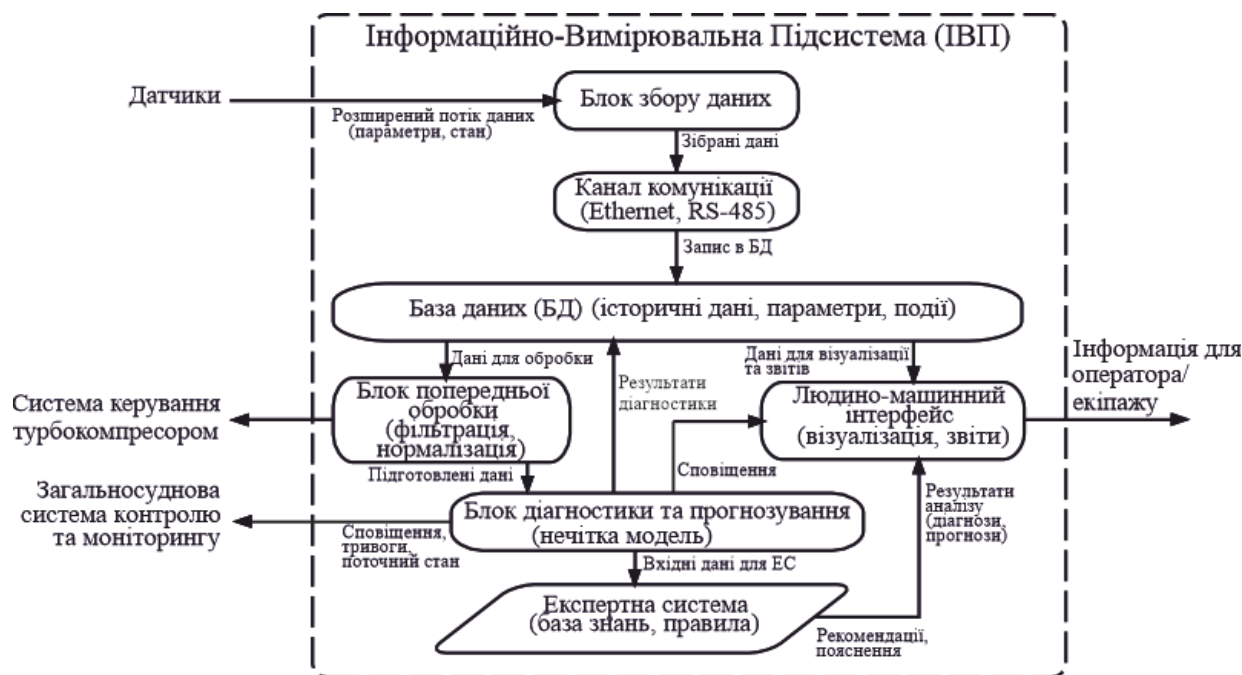


Рисунок 2 – Структурна схема інформаційно-вимірювальної системи моніторингу стану гібридного турбокомпресора

Надійну та швидкісну передачу зібраних даних забезпечує канал комунікації, реалізація якого залежить від вимог до швидкості, відстані та надійності. Централізоване зберігання історичних даних параметрів ТГУ, результатів діагностики, подій, аварійних сигналів та налаштувань системи здійснюється спеціалізованою базою даних (БД). Функціонал БД охоплює запис, забезпечення цілісності, швидкий доступ для аналізу та візуалізації, а також довгострокове архівування.

Перед аналізом дані проходять через блок попередньої обробки, що включає фільтрацію, нормалізацію/стандартизацію, агрегацію та виділення ознак.

Блок діагностики та прогнозування стану аналізує оброблені дані для виявлення поточних несправностей, аномалій та прогнозування майбутнього технічного стану ТГУ, включаючи ймовірність відмов. Основними функціями блоку є виявлення відхилень, класифікація несправностей, оцінка їх серйозності та прогнозування залишкового ресурсу компонентів.

Експертна система надає оперативні рекомендації оператору на основі діагностики та закладених знань за допомогою механізму логічного виводу.

Взаємодія оператора з системою відбувається через людсько-машинний інтерфейс, який візуалізує поточні параметри, історичні тренди, результати діагностики, прогнози, рекомендації та генерує звіти, забезпечуючи оперативне інформування через систему сповіщень та тривог.

Переваги такої структури ІВП включають розширений моніторинг, ранню діагностику, прогнозування відмов для ефективного планування обслуговування та допомогу екіпажу, що підвищує надійність, безпеку та оптимізує роботу ТГУ.

Якщо в процесі аналізу ІВП фіксує зміни, які можуть призвести до зниження ефективності роботи компресора, вона ініціює передачу відповідних керуючих сигналів або рекомендацій для корекції параметрів. Інформаційно-вимірювальна підсистема здійснює комплексну оцінку технічного стану турбокомпресора через моніторинг чотирьох основних груп параметрів, що характеризують різні аспекти функціонування агрегату [10, 11]:

1. Температурні характеристики відіграють фундаментальну роль у діагностиці турбокомпресора, оскільки відображають енергетичну ефективність термодинамічних процесів та стан теплонапружених елементів конструкції. Температура газів перед турбіною T_1 характеризує енергетичний потенціал робочого тіла та безпосередньо впливає на термічні напруження в лопатковому апараті турбіни. Температура газів після турбіни T_2 відображає ступінь розширення робочого тіла в турбінному ступені та характеризує ефективність енергетичного перетворення. Зростання різниці $T_1 - T_2$ свідчить про зниження ефективності турбіни внаслідок забруднення проточної частини або ерозійного зношування лопаток. Контроль температури повітря після компресора T_3 дозволяє оцінити ефективність компресорної ступені та виявити процеси деградації компресорного колеса, що проявляються у зростанні температури стиснення. Особливе значення має моніторинг температури підшипників T_p , оскільки цей параметр безпосередньо характеризує механічний стан опорних вузлів ротора.

2. Система моніторингу параметрів тиску забезпечує оцінку аеродинамічної ефективності турбокомпресора та виявлення деградаційних процесів у проточній частині. Тиск наддувного повітря P_1 характеризує продуктивність компресорної ступені та безпосередньо впливає на показники потужності двигуна. Зниження цього параметра при незмінних режимних умовах свідчить про погіршення аеродинамічних характеристик компресора внаслідок забруднення, ерозії або механічних пошкоджень робочого колеса. Контроль тиску випускних газів P_2 дозволяє оцінити гідравлічний опір випускного тракту та ефективність турбінної ступені. Зростання цього параметра може вказувати на забруднення турбінного колеса або збільшення гідравлічних втрат у випускній системі. Особливо важливим діагностичним параметром є перепад тиску на компресорі ΔP , який безпосередньо характеризує ступінь стиснення та енергетичну ефективність компресорної ступені.

3. Віброакустичні параметри є ключовим інформативним каналом для діагностики механічного стану турбокомпресора, дозволяючи виявляти дефекти ротодинамічної системи на ранніх стадіях [12, 13]. Середньоквадратичне значення вібрації відображає загальну динамічну активність агрегату і використовується для інтегральної оцінки. Його зростання може свідчити про дисбаланс ротора, ослаблення кріплень або проблеми з підшипниками. Спектральний аналіз вібросигналу надає детальну інформацію про природу та місцезнаходження дефектів, ідентифікуючи характерні частоти обертання ротора, лопаток та резонансні коливання. Контроль рівня шуму доповнює діагностику інформацією про аеродинамічні процеси, вказуючи на можливий помпаж чи кавітацію [14].

4. Моніторинг швидкісних параметрів забезпечує контроль кінематичних характеристик ротора турбокомпресора та виявлення порушень регулярності обертання. Частота обертання ротора n є основним режимним параметром, що визначає продуктивність агрегату та рівень динамічних навантажень. Нерівномірність обертання характеризує стабільність кінематичного режиму та може вказувати на розвиток механічних дефектів або порушень у системі регулювання. Зростання нерівномірності може свідчити про розвиток дисбалансу, ослаблення посадки робочих коліс на валу або нестабільність процесів у проточній частині.

5. Електричні характеристики асинхронної машини. Ця група параметрів є ключовою для діагностики саме гібридної частини установки. Моніторинг споживаного струму I , напруги U та електричної потужності $P_{ам}$ дозволяє оцінити ефективність роботи машини як у

руховому, так і в генераторному режимах. Аномальне зростання струму при незмінному навантаженні може свідчити про проблеми з обмотками або підшипниками електричної машини, а аналіз потужності дає змогу оцінити її внесок у загальний ККД СЕУ.

Ефективність діагностичної системи забезпечується комплексним аналізом всіх груп параметрів з використанням алгоритмів багатомірної статистичної обробки та розпізнавання образів. Це дозволяє виявляти складні комбіновані дефекти та прогнозувати розвиток деградаційних процесів.

Для побудови діагностичної моделі на основі нечіткої логіки ключові контрольовані параметри ТГУ та її узагальнений технічний стан представляються у вигляді лінгвістичних змінних [15]. Кожна лінгвістична змінна характеризується набором терм-множин (термів) – якісних оцінок, що описують можливі значення цієї змінної мовою, наближеною до природної людської мови. Для кожного терму визначається відповідна функція належності, яка встановлює ступінь, з яким конкретне числове значення параметра належить до цієї нечіткої множини (терму).

Для кожного контрольованого параметра, дані про який надходять від ІВП, визначаються відповідні лінгвістичні змінні:

1. Температура газів перед турбіною (T_1): Цей параметр є важливим індикатором теплового навантаження на турбіну та ефективності процесу згоряння в двигуні. Для нього можуть бути визначені такі терм-множини:

- «Низька» (μ_1): Вказує на можливі проблеми зі згорянням, недостатнє навантаження або несправності в паливній системі.
- «Нормальна» (μ_2): Оптимальний робочий діапазон.
- «Висока» (μ_3): Може свідчити про перевантаження, початкові проблеми з охолодженням або якістю палива.
- «Критична» (μ_4): Сигналізує про значне перевантаження, серйозні проблеми з охолодженням, наближення до небезпечних режимів.

2. Вібрація підшипникових вузлів ТГУ (V): Рівень вібрації є прямим показником механічного стану роторних частин, стану підшипників та загального балансування установки.

- «Мінімальна» (v_1): Ідеальний стан, низький рівень механічних шумів.
- «Допустима» (v_2): Нормальний рівень вібрації для даного типу обладнання в робочому режимі.
- «Помірна» (v_3): Вказує на можливий початковий знос, незначний дисбаланс або потребу у перевірці кріплень.
- «Значна» (v_4): Сигналізує про суттєвий знос підшипників, серйозний дисбаланс, можливе пошкодження лопаток або інші механічні проблеми.
- «Недопустима» (v_5): Критичний рівень вібрації, що може призвести до руйнування ТГУ.

3. Струм асинхронної машини (I): Характеризує навантаження на електричну частину. Терм-множини: «Низький» (i_1), «Номінальний» (i_2), «Підвищений» (i_3), «Критичний» (i_4).

Вихідною лінгвістичною змінною діагностичної системи є узагальнена оцінка «Технічний стан ТГУ» (K). Ця змінна інтегрує інформацію від аналізу всіх вхідних параметрів і відображає поточну працездатність та рівень деградації установки. Її терм-множина може включати:

- «Відмінний» (σ_1): Установка працює в оптимальному режимі, параметри в нормі, ознаки зносу відсутні.
- «Добрий» (σ_2): Незначні відхилення окремих параметрів, що не впливають на працездатність, можливий початковий природний знос.

– «Задовільний» (σ_3): Наявні певні відхилення, що вказують на необхідність посиленого контролю або планового обслуговування; ефективність може бути дещо знижена.

– «Незадовільний» (σ_4): Значні відхилення параметрів, висока ймовірність прогресування дефекту, потрібне найближче втручання для запобігання відмові.

– «Аварійний» (σ_5): Критичний стан, що вимагає негайної зупинки та ремонту для запобігання серйозним пошкодженням або катастрофічним наслідкам.

Для кожної терм-множини, що характеризує лінгвістичну змінну в системі діагностики суднового турбокомпресора, визначаються функції належності. У практиці побудови нечітких систем діагностики часто використовуються трапецієподібні та трикутні функції належності завдяки їхній простоті, наочності та обчислювальній ефективності:

$$\mu(x) = \begin{cases} 0, & x \leq a; \\ \frac{x-a}{x-b}, & a < x \leq b; \\ \frac{d-x}{d-c}, & b < x \leq c; \\ 1, & c < x \leq d; \\ 0, & x > d. \end{cases} \quad (1)$$

Приклади функцій належності для входних лінгвістичних змінних T_1 , V та I наведено на рис. 3, для вихідної змінної K – на рис. 4.

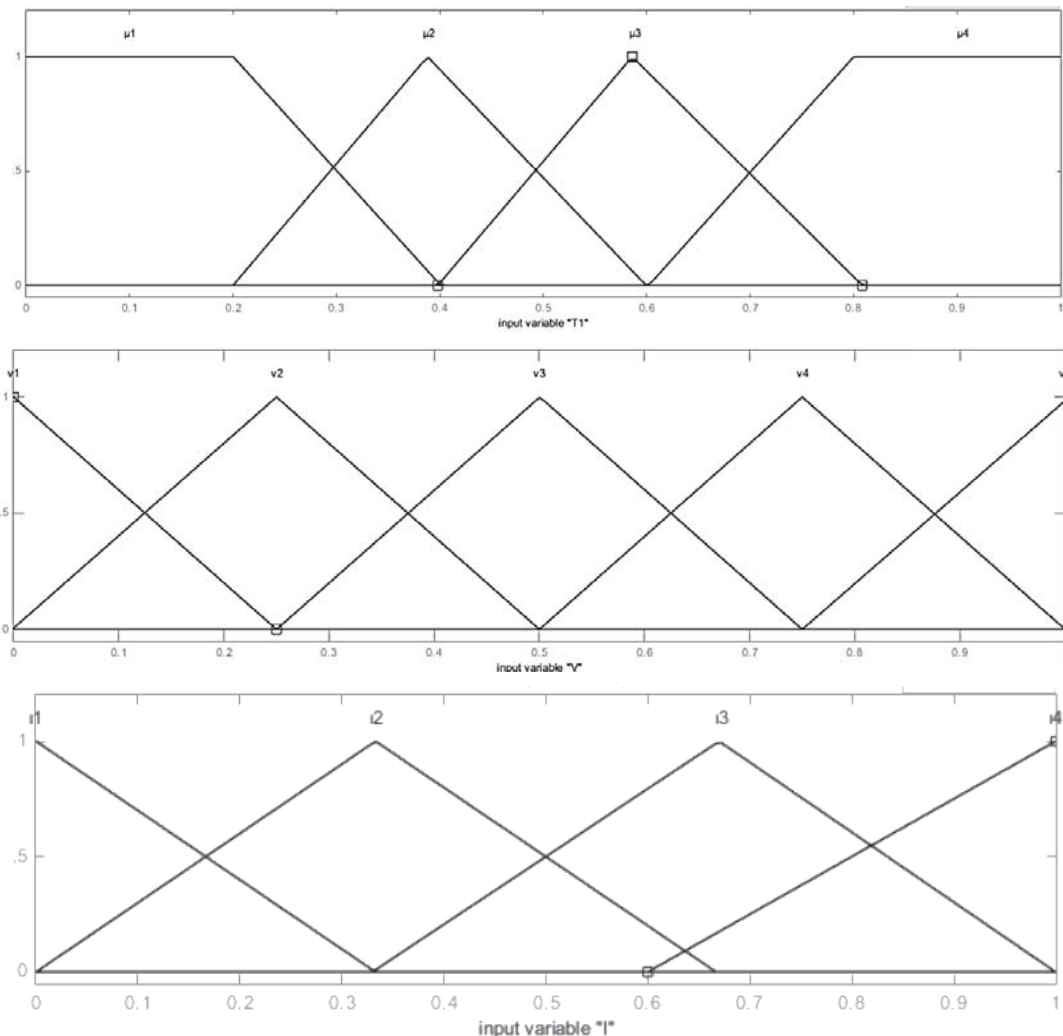


Рисунок 3 – Функції належності входних лінгвістичних змінних T_1 , V та I

На основі цих лінгвістичних змінних та їх терм-множин формується база правил нечіткого логічного виводу:

Правило 1: Якщо температура газів перед турбіною є «Висока» або вібрація є «Недопустима», то технічний стан є «Аварійний».

Правило 2: Якщо температура газів перед турбіною є «Висока» та вібрація є «Значна» ТА тиск наддуву є «Знижений», то технічний стан є «Незадовільний».

Правило 3: Якщо всі параметри є в межах «Нормальних» значень, то технічний стан є «Відмінний».

Правило 4: Якщо вібрація є «Значна» та струм асинхронної машини є «Підвищений», то технічний стан є «Незадовільний».

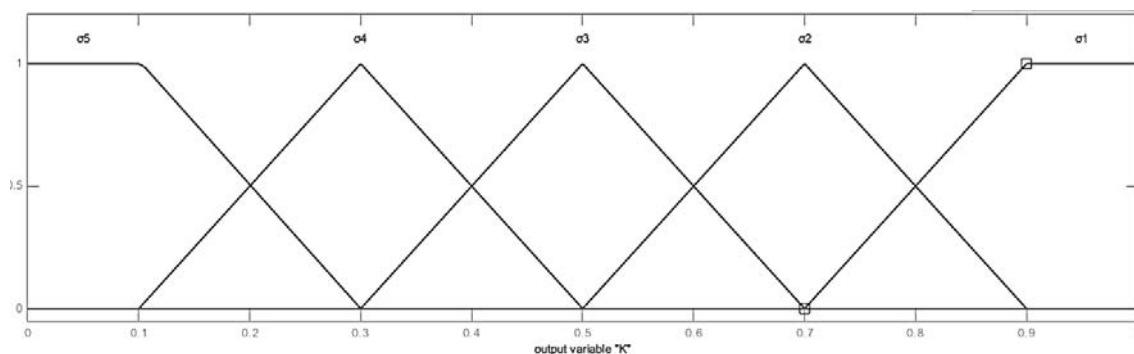


Рисунок 4 – Функції належності вихідної змінної K

Отримані від блоку попередньої обробки кількісні значення параметрів фазифікуються, обробляються системою нечіткого виводу за допомогою бази правил, і результат дефазифікується, перетворюючись на чітку кількісну або якісну оцінку, яка передається оператору та використовується експертною системою для формування рекомендацій [16, 17]. Цей підхід забезпечує гнучку та адаптивну діагностику, що враховує всю складність та невизначеність реальних умов експлуатації суднового турбокомпресора [7].

Для дефазифікації використовується метод центра ваги:

$$x_0 = \frac{\sum_i x_i \cdot \mu(x_i)}{\sum_i \mu(x_i)}. \quad (2)$$

Технічний стан турбокомпресора характеризується інтегральним показником K , який обчислюється на основі нечіткого виведення:

$$K = F\{T_1, T_2, T_3, T_p, P_1, P_2, \Delta P, V, n\}, \quad (3)$$

де F – оператор нечіткого виведення.

Для прогнозування залишкового ресурсу використовується динамічна модель деградації технічного стану:

$$\frac{dK}{dt} = -\alpha(K) \cdot f(L, E), \quad (4)$$

де $\alpha(K)$ – функція швидкості деградації, залежна від поточного стану; L – експлуатаційні навантаження; E – зовнішні впливи; $f(L, E)$ – функція впливу експлуатаційних факторів.

Залишковий ресурс T_{res} визначається як час досягнення граничного стану K_{max} :

$$T_{res} = \int_{K(t)}^{K_{max}} \frac{dt}{\alpha(K) \cdot f(L, E)}. \quad (5)$$

Час відмови T_{res} визначається шляхом інтегрування зворотної величини швидкості деградації $\alpha(K) \cdot f(L, E)$ в діапазоні від поточного стану $K(t)$ до граничного стану K_{max} .

Основні результати та їх обговорення. Для розробки та комп'ютерного моделювання нечіткої моделі діагностики технічного стану турбокомпресорної установки (ТГУ) було використано редактор нечітких систем FIS у програмному комплексі MATLAB. У цьому редакторі модель нечіткого висновку представлена як ієрархічна структура, що інтегрує вхідні дані, базу правил та механізми генерації вихідних значень.

Для дослідження поведінки розробленої моделі діагностики в середовищі FIS MATLAB побудовані поверхні рішень. Приклад таких поверхонь наведено на рис. 5.

Вони наочно відображають залежність вихідної діагностичної змінної K від ключових вхідних параметрів, що дає можливість візуально оцінити коректність бази правил та точність налаштувань функцій належності.

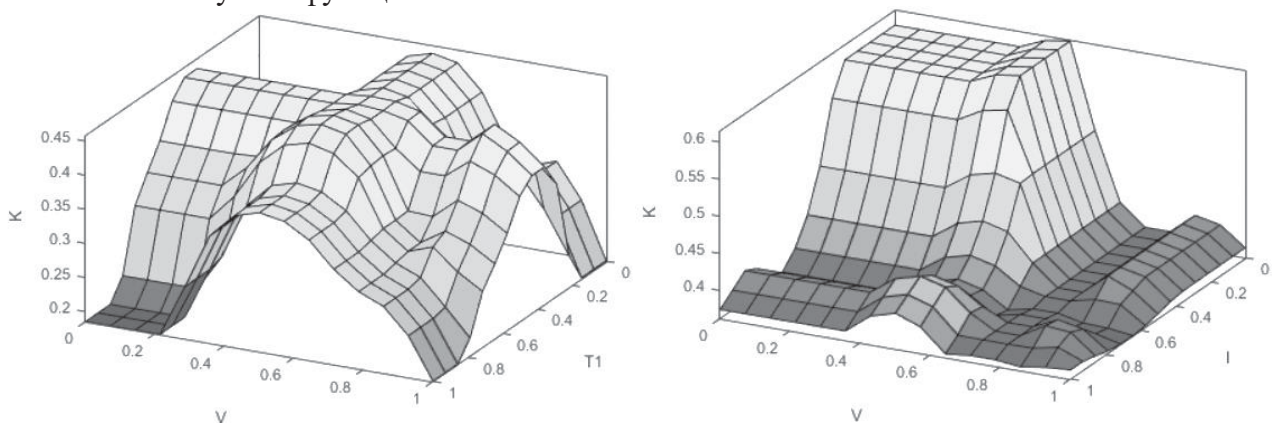


Рисунок 5 – Поверхні рішень нечіткої моделі системи моніторингу стану гібридного турбокомпресора

Оцінка ефективності створеної моделі здійснюється шляхом комп'ютерного моделювання в MATLAB Simulink із застосуванням імітаційної моделі [5]. Отримані результати дозволяють визначити рівень точності діагностики, швидкість реакції на виявлення несправностей та загальну надійність системи.

Висновки. Реалізація запропонованої інформаційно-вимірювальної системи дозволяє значно підвищити ефективність роботи турбокомпресора, забезпечити прогнозування потенційних несправностей та оптимізувати процеси керування. Вона виконує функцію не лише засобу збору даних, а й інтелектуального аналізу технічного стану обладнання, що сприяє безперервному підвищенню надійності та продуктивності суднового двигуна.

Перспективи подальших досліджень. Розроблена концепція інтелектуальної інформаційно-вимірювальної підсистеми для моніторингу стану суднових турбокомпресорів відкриває низку перспективних напрямків для подальших наукових та практичних досліджень. По-перше, існує значний потенціал у вдосконаленні алгоритмів діагностики та прогнозування шляхом застосування складніших моделей машинного навчання, таких як глибокі нейронні мережі або гібридних підходів, що поєднують переваги нечіткої логіки, нейронних мереж та експертних систем. По-друге, важливим напрямком є розвиток методів сенсорного злиття для інтеграції даних з різноманітних датчиків, що дозволить отримувати більш повне та надійне уявлення про стан ТГУ. Також перспективним є дослідження інтеграції розробленої ІВП з концепцією цифрового двійника турбокомпресорної установки, що уможливить проведення симуляцій, аналіз «що-якщо» сценаріїв та оптимізацію стратегій технічного обслуговування. Нарешті, дослідження можливостей оптимізації енергоефективності ТГУ на основі детальних даних моніторингу та прогнозів стану може призвести до розробки нових стратегій керування, що зменшують витрати палива та шкідливі викиди.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Woodyard D. Introduction: A Century of Diesel Progress. Pounder's Marine Diesel Engines and Gas Turbines. 2009. С. 2–5. URL: <https://doi.org/10.1016/B978-0-7506-8984-7.00034-5>.
2. Adams J., Parlikad A. K., Amadi-Echendu J. A Bibliographic Review of Trends in the Application of 'Criticality' Towards the Management of Engineered Assets. Lecture Notes in Mechanical Engineering : Proceedings of the 12th World Congress on Engineering Asset Management and the 13th International Conference on Vibration Engineering and Technology of Machinery, 2–4 aug. 2017 p. Brisbane, Australia, 2017. С. 11–21. URL: <https://doi.org/10.3390/en17020392>.
3. Shiraishi K. Y., Ono Y., Sugishita K. Development of Large Marine Hybrid Turbocharger for Generating Electric Power with Exhaust Gas from the Main Engine. Shiraishi Mitsubishi Heavy Industries Technical Review. 2010. Vol. 47, no. 3. P. 3–53.
4. Ono Y., Shiraishi K., Yamashita Y. Application of a Large Hybrid Turbocharger for Marine Electric-power Generation. Mitsubishi Heavy Industries Technical Review. 2012. Vol. 49, no. 1. P. 29–33.
5. Аналіз ефективності роботи системи керування судновою комплексною електроенергетичною турбокомпресорною установкою з урахуванням впливу зовнішніх факторів /С. В. Вороненко та ін. Прикладні питання математичного моделювання. 2020. Т. 3, № 2.1. С. 60–71. URL: <https://doi.org/10.32782/kntu2618-0340/2020.3.2-1.5> (дата звернення: 31.05.2025).
6. TCA Project Guide. Exhaust Gas Turbocharger [Електронний ресурс]. – URL: <https://engine.od.ua/ufiles/TCA-turbochargers-Project-Guide.pdf> (дата звернення: 25.05.2025).
7. Parametric investigation and optimal selection of the hybrid turbocharger system for a large marine four-stroke dual-fuel engine / M. Figari та ін. Applied Thermal Engineering. 2022. Т. 208. С. 117991. URL: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.117991> (дата звернення: 31.05.2025).
8. Gharib H., Kovács G. Implementation and Possibilities of Fuzzy Logic for Optimal Operation and Maintenance of Marine Diesel Engines. Machines. 2024. Vol. 12, no. 6. URL: <https://doi.org/10.3390/machines12060425>.
9. Вороненко С., Короленко Е. Інтегровальний підхід до діагностики судових турбогенераторів. IV осінні наукові читання: збірник наукових публікацій «Велес» за матеріалами міжнар. наук.-практ. конф. м. Київ, 12 жовт. 2015 р : Ч. 1., м. Київ, 12 жовт. 2015 р. Київ, 2015. С. 55–56.
10. Fuzzy Inference System Development for Turbogenerator Failure Diagnosis on Floating Production Offloading and Storage Platform / P. F. Castro et al. Energies. 2024. Vol. 17, no. 2. P. 392. URL: <https://doi.org/10.3390/en17020392> (дата звернення: 25.05.2025).
11. Fuzzy logic control of diesel engine turbocharging and exhaust gas recirculation / R. Wijetunge et al. Food Chemistry. 2000. P. 11–21.
12. Digital Acoustic Signal Processing Methods for Diagnosing Electromechanical Systems / O. Polyvoda et al. Advances in Intelligent Systems and Computing. Cham, 2019. P. 97–109. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-030-26474-1_7 (дата звернення: 25.05.2025).
13. Діагностика турбокомпресора дизельного двигуна за допомогою аналізу віброакустичного спектру / Р. Варбанець та ін. Авіаційно-космічна техніка і технологія. 2020. № 6(166). С. 24–33 <http://dx.doi.org/10.32620/akt.2020.6.03>. (дата звернення: 25.05.2025).
14. ISO 20816-8:2018 Mechanical vibration — Measurement and evaluation of machine vibration Part 8: Reciprocating compressor systems URL: <https://www.iso.org/standard/75440.html> (дата звернення: 25.05.2025).
15. Zadeh L. A. Fuzzy sets. Information and Control. 1965. Т. 8, № 3. С. 338–353. URL: [https://doi.org/10.1016/s0019-9958\(65\)90241-x](https://doi.org/10.1016/s0019-9958(65)90241-x) (дата звернення: 31.05.2025).

16. Mamdani E. H. Application of fuzzy algorithms for control of simple dynamic plant. *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*. 1974. Vol. 121, no. 12. P. 1585. URL: <https://doi.org/10.1049/piee.1974.0328> (date of access: 31.05.2025).
17. Takagi T., Sugeno M. Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*. 1985. SMC-15, № 1. C. 116–132. URL: <https://doi.org/10.1109/tsmc.1985.6313399> (дата звернення: 31.05.2025).

REFERENCES

1. Woodyard, D. (2009). Introduction: A Century of Diesel Progress. *U Pounder's Marine Diesel Engines and Gas Turbines*. (s. 2–5). <https://doi.org/10.1016/B978-0-7506-8984-7.00034-5>.
2. Adams, J., Parlikad, A. K., & Amadi-Echendu, J. (2017). A Bibliographic Review of Trends in the Application of ‘Criticality’ Towards the Management of Engineered Assets. *U Lecture Notes in Mechanical Engineering* (s. 11–21). <https://doi.org/10.3390/en17020392>.
3. Shiraishi, K. Y., Ono, Y., & Sugishita, K. (2010). Development of Large Marine Hybrid Turbocharger for Generating Electric Power with Exhaust Gas from the Main Engine. *Shiraishi Mitsubishi Heavy Industries Technical Review*, 47(3), 3–53.
4. Ono, Y., Shiraishi, K., & Yamashita, Y. (2012). Application of a Large Hybrid Turbocharger for Marine Electric-power Generation. *Mitsubishi Heavy Industries Technical Review*, 49(1), 29–33.
5. Voronenko, S. V., Subbotin, O. V., Lebedenko, Y. O., & Rudakova, H. V. (2020). Analysis of the Control System Efficiency of the Ship Integrated Electricity Installing Turbo with the Influence of External Factors. *Applied Questions of Mathematical Modeling*, 3(2.1). <https://doi.org/10.32782/kntu2618-0340/2020.3.2-1.5>.
6. TCA Project Guide. Exhaust Gas Turbocharger. (b. d.). <https://engine.od.ua/ufiles/TCA-turbochargers-Project-Guide.pdf>.
7. Figari, M., Theotokatos, G., Coraddu, A., Stoumpos, S., & Mondella, T. (2022). Parametric investigation and optimal selection of the hybrid turbocharger system for a large marine four-stroke dual-fuel engine. *Applied Thermal Engineering*, 208, 117991. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.117991>.
8. Gharib, H., & Kovács, G. (2024). Implementation and Possibilities of Fuzzy Logic for Optimal Operation and Maintenance of Marine Diesel Engines. *Machines*, 12(6). <https://doi.org/10.3390/machines12060425>.
9. Voronenko, S., & Korolenko, E. (2015). Intehruvalnyi pidkhid do diahnostryky sudnovykh turbogeneratoriv. *U IV osinni naukovi chytannia: zbirnyk naukovykh publikatsii «Veles» za materialamy mizhnar. nauk.-prakt. konf. m. Kyiv, 12 zhovt. 2015 r* (s. 55–56).
10. Castro, P. F., Lira, G. R. S. d., Vilar, P. B., Costa, E. G. d., & Carvalho, F. B. S. (2024b). Fuzzy Inference System Development for Turbogenerator Failure Diagnosis on Floating Production Offloading and Storage Platform. *Energies*, 17(2), 392. <https://doi.org/10.3390/en17020392>.
11. Wijetunge, R. S., Brace, C. J., Hawley, J. G., & Vaughan, N. D. (2000). Fuzzy logic control of diesel engine turbocharging and exhaust gas recirculation. *Food Chemistry*. P. 11–21.
12. Polyvoda, O., Rudakova, H., Kondratieva, I., Rozov, Y., & Lebedenko, Y. (2019). Digital Acoustic Signal Processing Methods for Diagnosing Electromechanical Systems. *U Advances in Intelligent Systems and Computing* (s. 97–109). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-26474-1_7.
13. Varbanets, R. A., Klymenko, V. H., Minchev, D. S., Zalozh, V. I., Kyrnats, V. I., & Aleksandrovska, N. I. (2020). Diahnostryka turbokompresora dyzelnoho dvyhuna za dopomohoiu analizu vibroakustychnoho spektru. *Aerospace technic and technology*, (6), 24–33. <https://doi.org/10.32620/akt.2020.6.03>.
14. ISO 20816-8:2018 Mechanical vibration – Measurement and evaluation of machine vibration Part 8: Reciprocating compressor systems URL: <https://www.iso.org/standard/75440.html> (дата звернення: 25.05.2025).

15. Zadeh, L. A. (1965). Fuzzy sets. *Information and Control*, 8(3), 338–353. [https://doi.org/10.1016/s0019-9958\(65\)90241-x](https://doi.org/10.1016/s0019-9958(65)90241-x).
16. Mamdani, E. H. (1974). Application of fuzzy algorithms for control of simple dynamic plant. *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*, 121(12), 1585. <https://doi.org/10.1049/piee.1974.0328>.
17. Takagi, T., & Sugeno, M. (1985). Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, SMC-15(1), 116–132. <https://doi.org/10.1109/tsmc.1985.6313399>.

Lebedenko Yu. O., Tymofeev K. V., Voronenko S. V., Bihun S. V. INTELLIGENT INFORMATION-MEASUREMENT SYSTEM FOR DIAGNOSTICS AND MONITORING OF A HYBRID MARINE TURBOCHARGER WITH A FUZZY MODEL

This paper focuses on enhancing the efficiency and reliability of modern marine power units through advanced diagnostic and monitoring systems. It presents an intelligent information-measuring system (IMS) designed for real-time condition monitoring of hybrid marine turbochargers (HMTCs), which integrate exhaust gas recovery with auxiliary electric motor/generator support. Due to their complexity and demanding operational conditions, HMTCs require sophisticated diagnostics. The proposed IMS leverages fuzzy logic for adaptive control and predictive maintenance. The IMS is structured to process multi-parameter data streams from sensors that monitor not only key parameters of the turbo-gas-dynamic components (such as temperature, pressure, rotational speed, vibrations, and lubrication) but also the operational parameters of the electrical machine. Fuzzy logic algorithms enable precise sensor data interpretation, addressing real-world uncertainty and formalizing expert knowledge. The system employs fuzzification, fuzzy inference rules, and defuzzification to generate accurate diagnostic assessments, distinguishing normal operation, potential deviations, and critical faults. With growing industry demands for fuel efficiency and reliability, conventional diagnostics often fail to account for HMTC complexities. The scientific novelty of this research lies in its adaptive diagnostic process using fuzzy logic, which models expert-derived rules for nuanced fault detection. The IMS aids in optimizing control parameters, regulating supercharging, and activating emergency systems, thereby improving early fault detection. This IMS has significant maritime applications, particularly for vessels with hybrid turbocharging. By supporting condition-based maintenance, it reduces downtime and enhances operational efficiency. Its ability to ensure reliable engine performance promotes safer maritime operations and contributes to sustainable shipping through improved fuel economy. Future research could explore experimental validation and broader integration into ship energy management systems.

Key words: marine power plant; combined turbocompressor; information-measuring system; fuzzy logic; adaptive control; condition diagnostics; monitoring.

© Лебеденко Ю. О., Тимофеев К. В., Вороненко С. В., Бігун С. В.

Статтю прийнято до редакції 01.06.2025