

ВІДГУК

офіційного опонента доктора технічних наук, професора
Митрофанова Олександра Сергійовича
на дисертаційну роботу **Заложа Віталія Івановича**
**«Методологія діагностування суднових дизелів за параметрами
робочого процесу в реальному часі»**, представлену
на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук
за спеціальністю 05.05.03 – двигуни та енергетичні установки

1. Загальна характеристика роботи та її актуальність

Ефективний контроль технічного стану суднових дизелів є одним з ключових завдань сучасної морської інженерії. Якість діагностичного контролю безпосередньо впливає на надійність експлуатації суднових енергетичних установок, рівень споживання палива та обсяг шкідливих викидів. Особливої діагностичної уваги потребують системи, що формують робочий процес у циліндрах: паливна апаратура високого тиску, механізм газорозподілу та циліндропоршнева група. Від коректного функціонування цих систем залежать не лише економічні показники експлуатації, але й безпека судноплавства загалом.

Аналіз сучасного стану технічної діагностики суднових дизелів свідчить про те, що переважна більшість існуючих портативних систем функціонує в режимі відкладеного аналізу. Такий підхід, успадкований від технологій третьої промислової революції, не дозволяє оперативно виявляти нестабільність роботи критичних вузлів двигуна. Водночас практика судноплавства вимагає отримання діагностичної інформації безпосередньо під час роботи двигуна, що дало б змогу запобігати аварійним ситуаціям на ранніх стадіях їх розвитку.

Зазначене формує наукове протиріччя між потребою отримувати високоточну, швидкодіючу та інформативну діагностичну інформацію про робочі процеси суднового дизельного двигуна в реальному часі і технічними обмеженнями портативних засобів діагностики щодо обчислювальних ресурсів, пропускну здатності каналів зв'язку, енергоспоживання та кількості доступних діагностичних параметрів. На розв'язання цього протиріччя спрямована дисертаційна робота Заложа В.І.

Автором висунуто гіпотезу про те, що застосування методології діагностування, побудованої на аналізі показників циклової варіативності робочого процесу в реальному часі, забезпечить підвищення оперативності та достовірності визначення технічного стану двигуна без необхідності

втручання в його конструкцію. Такий підхід узгоджується з концепцією Індустрії 4.0 та відповідає сучасним тенденціям цифровізації морського транспорту.

У такій постановці дисертаційна робота Заложа В.І. безсумнівно є актуальною і своєчасною.

2. Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації

Наукові положення дисертаційної роботи спираються на ґрунтовний аналіз вітчизняних та закордонних публікацій з проблематики діагностування транспортних дизелів. Теоретичні висновки підкріплені результатами чисельного моделювання в середовищі онлайн-сервісу *Blitz-PRO* та верифіковані експериментальними дослідженнями на реальних суднових двигунах.

Достовірність отриманих результатів забезпечується коректним застосуванням математичного апарату, зокрема методів чисельної обробки даних діагностики, включаючи методи чисельного диференціювання та цифрової фільтрації на базі дискретного перетворення Фур'є та фільтрів *Butterworth*; методів аналізу і синтезу робочого процесу при зіставленні розрахункових і експериментальних результатів, отриманих у режимі реального часу; методу нелінійної мінімізації *PowellMJD'64*.

Експериментальна база досліджень охоплює як лабораторні дизель-генератори, так і головні та допоміжні двигуни морських суден «*Vilnius*» та «*Kaunas*». Отримані залежності узгоджуються з фізичними уявленнями про процеси, що відбуваються в циліндрах дизельних двигунів.

Автором систематизовано причини виникнення циклової варіативності робочого процесу та обґрунтовано її використання як діагностичної ознаки технічного стану. Показано, що нестабільність послідовних робочих циклів переважно зумовлена коливаннями в системі паливоподачі та відхиленнями у роботі газорозподільного механізму.

Запропонована система діагностичних критеріїв включає комплексний показник нерегулярності циклів CI_p , коефіцієнт варіації тиску COV_{P_i} та показники варіації фаз паливоподачі і газорозподілу. Для кожного з критеріїв встановлено граничні значення, що дозволяють класифікувати технічний стан двигуна за трьома рівнями: нормальний, потребує уваги, незадовільний.

Практична апробація розроблених методів підтверджена актами впровадження від судноплавної компанії «Укрферрі» (м. Одеса) та

морської сервісної компанії *Mariq Service* (м. Гамільтон, Канада), що свідчить про визнання результатів роботи фахівцями галузі.

Висновки дисертації логічно випливають із проведених досліджень, а сформульовані рекомендації мають чітку практичну спрямованість.

3. Новизна наукових положень, висновків та рекомендацій

Наукова новизна дисертаційної роботи визначається оригінальним підходом до вирішення проблеми діагностування судових дизелів, який базується на аналізі циклової варіативності робочого процесу в режимі реального часу. Раніше подібне завдання в такій постановці не формулювалося та не вирішувалося стосовно портативних систем діагностики морських дизелів.

Вперше запропонований комплексний показник нерегулярності робочих циклів CI_p , який на відміну від існуючих показників, забезпечує інтегральну оцінку варіативності робочого процесу. Це дозволяє отримати єдиний кількісний критерій для комплексної оцінки технічного стану двигуна.

Заслугове на увагу розроблений метод аналізу зміни коефіцієнта варіації тиску в робочому циліндрі двигуна по куту повороту колінчастого валу (COV_p). На відміну від існуючих методів, це дає можливість окремо оцінювати стабільність роботи клапанного механізму і паливної апаратури високого тиску, підвищуючи точність ідентифікації можливих несправностей цих систем.

Новим є також метод оцінки варіації фаз паливоподачі та газорозподілу на основі аналізу вібросигналів. Запропонований підхід забезпечує додатковий канал діагностичної інформації, що підвищує достовірність ідентифікації несправностей.

Удосконалено алгоритм визначення верхньої мертвої точки поршня і подальшої синхронізації даних при відсутності інформації про фактичний ступінь стиснення в циліндрі та тиск наддувочного повітря, що є характерним для сучасних дизелів зі змінними фазами газорозподілу.

Вартим уваги є удосконалення методики взаємної оцінки робочих процесів та вібраційних діаграм паливної апаратури високого тиску та механізму газорозподілу, що дозволило автору розробити алгоритми діагностики відповідних систем двигунів у реальному часі за рахунок зменшення впливу шумів вібродіаграми.

Одержали подальший розвиток методи співставлення діагностичних параметрів з даними морських випробувань *Sea Trials* та математичного моделювання в онлайн-сервісі *Blitz-PRO*, що логічно

доповнює загальну методологію і розширює можливості її практичного застосування.

В цілому наукова новизна роботи є достатньою для докторської дисертації і відповідає вимогам до робіт такого рівня.

4. Практичне значення отриманих результатів

Практична цінність дисертаційної роботи полягає у створенні методології для розробки портативних діагностичних систем нового покоління, здатних функціонувати в режимі реального часу. Запропоновані методи та алгоритми орієнтовані на безпосереднє використання в умовах експлуатації суднових дизелів.

Розроблені підходи дають змогу отримувати оперативну інформацію про стабільність роботи ключових систем двигуна – паливної апаратури, газорозподільного механізму та циліндропоршневої групи. Це створює передумови для переходу від традиційної схеми відкладеного аналізу до діагностики технічного стану в реальному часі з можливістю оперативного коригування налаштувань безпосередньо в процесі роботи двигуна.

Результати теоретичних та експериментальних досліджень реалізовано в програмному забезпеченні портативної системи діагностики *DEPAS 5.0W*. Система забезпечує бездротову передачу даних та візуалізацію результатів на мобільному пристрої, що суттєво спрощує процедуру діагностичного контролю для суднових механіків.

Результати дисертації знайшли практичне застосування у навчальному процесі профільних кафедр Одеського національного морського університету та Дунайського інституту Національного університету «Одеська морська академія». Виробниче впровадження здійснено на теплоходах «*Vilnius*» та «*Kaunas*» судноплавної компанії «Укрферрі», а також у морській сервісній компанії *Mariq Service* (Канада), що підтверджено відповідними актами.

Таким чином, практичне значення роботи є вагомим і підтверджується реальним впровадженням у виробництво та освітній процес.

5. Структура та зміст дисертації

Дисертаційна робота має логічну структуру, що відповідає меті та завданням дослідження. Робота складається зі вступу, п'яти розділів, загальних висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг дисертації становить 429 сторінок, з яких 300 сторінок припадає на основний текст. Робота містить 115 рисунків та 24 таблиці, що наочно ілюструють отримані результати. Бібліографічний список налічує 228

найменувань вітчизняних та закордонних джерел. Додатки розміщено на 99 сторінках. В них наведені результати додаткових розрахунків, та матеріали, що підтверджують впровадження результатів дослідження. Слід зазначити, що дисертація за структурою побудови відповідає діючим вимогам МОН України.

У вступі чітко окреслено актуальність обраної теми, сформульовано наукову проблему та наукову новизну. Визначено мету, завдання, об'єкт та предмет дослідження. Наведено відомості про практичне значення та апробацію результатів.

Перший розділ присвячено критичному огляду сучасного стану діагностики суднових дизелів. Автором проведено класифікацію існуючих систем за функціональним призначенням та способом реалізації. Проаналізовано можливості найбільш поширених комерційних систем діагностики. Обґрунтовано необхідність переходу до методів реального часу та окреслено перспективи інтеграції технологій Індустрії 4.0., також показано застосування системи діагностування для визначення показників енергоефективності суден.

У другому розділі викладено теоретичні засади розроблених методів діагностування. Детально розглянуто природу циклової варіативності робочого процесу та її зв'язок з технічним станом систем двигуна. Запропоновано метод аналізу коефіцієнта варіації тиску по куту повороту колінчастого валу та комплексний показник нерегулярності циклів. Описано метод оцінки варіації фаз паливоподачі та газорозподілу на основі вібраційних сигналів. Висунуто гіпотезу, яка покладена в основу наукового дослідження: застосування методології діагностування суднових дизелів на основі аналізу показників циклової варіативності робочого процесу в реальному часі дозволить підвищити оперативність та достовірність визначення технічного стану без втручання в конструкцію систем двигуна, що сприятиме підвищенню ефективності його експлуатації.

Теоретично обґрунтовано комплексний підхід до діагностики робочого процесу суднових дизелів у режимі реального часу, що передбачає паралельний аналіз індикаторних діаграм та вібродіаграм. Для зменшення впливу шумів застосовано метод цифрової фільтрації з використанням фільтра низьких частот *Butterworth* 11-го порядку з оптимізованою частотою зрізу.

Розроблено метод визначення поточного технічного стану судових дизелів шляхом співставлення вимірних діагностичних параметрів з даними морських випробувань *Sea Trials*, апроксимованими за допомогою регресійних моделей. Такий підхід забезпечує порівняння робочих параметрів із еталонними характеристиками на будь-якому режимі навантаження, що, на думку здобувача, забезпечує безперервність і гнучкість діагностики.

Запропоновано метод діагностування газотурбонагнітачів судових дизелів на основі спектрального аналізу акустичного сигналу. Метод базується на визначенні «лопаткової» гармоніки в спектрі турбонагнітача з подальшим розрахунком частоти обертання ротора та аналізом амплітуди гармоніки на основній частоті. Для усунення ефекту витoku дискретного спектра (*leakage effect*) застосовано методи віконного перетворення.

Третій розділ зосереджено на проблемі точного визначення верхньої мертвої точки поршня. Проаналізовано обмеження існуючих підходів та запропоновано удосконалений метод, що не потребує інформації про фактичний ступінь стиснення в циліндрі та тиск наддувного повітря. Це особливо важливо для сучасних двигунів зі змінними фазами газорозподілу. Запропоновано алгоритм попередньої синхронізації, який визначає початкове положення ВМТ з достатньою для більшості практичних випадків точністю. Використовується як перше наближення для розробленого методу.

Четвертий розділ присвячено чисельному моделюванню робочого процесу судових дизелів в середовищі онлайн-сервісу *Blitz-PRO*. Математична модель базується на квазістаціонарній та одновимірній нестационарній системах рівнянь, що описують процеси у відкритих термодинамічних системах двигуна. Проведено імітацію типових несправностей паливної апаратури та газорозподільного механізму, досліджено їх вплив на параметри циклової варіативності. За результатами моделювання встановлено граничні значення діагностичних критеріїв для класифікації технічного стану двигуна за трьома рівнями: нормальний стан, потребує уваги, незадовільний стан. Проведено порівняльний аналіз впливу різних типів несправностей на діагностичні критерії.

У п'ятому розділі висвітлено практичну реалізацію розробленої методології у вигляді портативної системи діагностики *DEPAS 5.0W*. Описано структуру системи, що включає датчик тиску, вібраційний датчик на магнітній платформі, вимірювальний блок з бездротовою передачею даних та програмне забезпечення для мобільного пристрою. Таке рішення

мінімізує обсяг апаратної частини та робить контроль робочого процесу доступним широкому колу суднових механіків.

Наведено результати експериментальних досліджень на головних та допоміжних двигунах теплоходів «*Vilnius*» та «*Kaunas*», а також на лабораторних стендах на базі суднових дизель-генераторів *Weichai WP4* та 4Ч 17,5/24, що підтвердили працездатність розроблених алгоритмів. Система забезпечує точність вимірювання тиску з похибкою не більше 1,5 %, а фазових характеристик до 0,3 ° ПКВ, що перевищує вимоги класифікаційних товариств.

На основі порівняльного аналізу ймовірностей виявлення нестійкого дефекту доведено, що при типовому часі спостереження 60 секунд система реального часу забезпечує ймовірність виявлення у 3,6...7,6 рази вищу порівняно з традиційними системами відкладеного аналізу.

Практичну ефективність розроблених методів підтверджено на прикладі діагностування головного двигуна *MAN 7S50MC* контейнеровоза «*EGY CROWN*». Завдяки діагностуванню в реальному часі та коригуванню таймінгу паливної апаратури досягнуто покращення індикаторних параметрів: максимальний тиск згоряння збільшився на 15,3 %, середній індикаторний тиск та індикаторна потужність циліндра зросли на 6,9 %.

У загальних висновках систематизовано основні результати роботи, сформульовано наукові положення та надано рекомендації щодо практичного застосування розробленої методології.

Структура дисертації є обґрунтованою, послідовність викладення матеріалу є логічною. Обсяг розділів збалансований та відповідає їх змістовному наповненню.

6. Повнота викладу в опублікованих працях наукових положень, висновків, рекомендацій

Основні результати дисертаційного дослідження знайшли повне відображення у 49 наукових публікаціях. Серед них 22 статті опубліковано у фахових виданнях України та закордонних журналах, причому 6 статей у виданнях, що індексуються міжнародною наукометричною базою *Scopus* (1 стаття у виданні категорії *Q1*, 4 статті категорії *Q2*, 1 стаття категорії *Q4*). Апробаційний характер мають 27 тез доповідей на міжнародних науково-технічних конференціях та конгресах.

Публікації охоплюють усі ключові аспекти дисертаційної роботи: теоретичні основи аналізу циклової варіативності, методи визначення верхньої мертвої точки, алгоритми обробки вібросигналів, результати чисельного моделювання та експериментальних досліджень. Наявність

публікацій у високорейтингових закордонних виданнях свідчить про визнання результатів роботи міжнародною науковою спільнотою.

Кількість та якість публікацій відповідають вимогам МОН України до докторських дисертацій. Повнота викладу наукових положень, висновків та рекомендацій є достатньою.

7. Відповідність принципам академічної доброчесності

Здобувач дотримувався принципів академічної доброчесності при роботі над дисертацією. Дисертаційна робота Заложа В.І. є самостійним науковим дослідженням. За результатами перевірки на академічну доброчесність ознак плагіату, фабрикації чи фальсифікації даних не виявлено. Запозичення з наукових джерел оформлені коректно з відповідними посиланнями. У спільних наукових публікаціях зазначено особистий внесок здобувача.

8. Оцінка змісту дисертації, її завершеності в цілому та зауваження щодо її оформлення

Дисертація Заложа В.І. є завершеною науковою працею, що містить теоретично обґрунтовані та експериментально підтверджені результати.

Зміст роботи відповідає заявленій темі, меті та завданням дослідження. Структура дисертації логічна, виклад матеріалу послідовний, висновки обґрунтовані та випливають із проведених досліджень.

Оформлення дисертації в цілому відповідає встановленим вимогам. Текст викладено грамотно, ілюстративний матеріал є інформативним та наочним. Реферат адекватно відображає зміст дисертаційної роботи.

Разом з тим, є окремі зауваження, які не впливають на загальну позитивну оцінку роботи, але можуть бути враховані здобувачем у подальшій науковій діяльності.

9. Зауваження і рекомендації до змісту дисертації

- 1) Межі застосовності розробленої методології для суднових дизелів різних типорозмірів (малообертних, середньообертних та високообертних) потребують додаткового уточнення, зокрема в частині адаптації граничних значень діагностичних критеріїв.
- 2) Вплив характеристик палива (в'язкості, вмісту домішок, використання альтернативних видів палива) на параметри циклової варіативності розглянуто недостатньо детально.
- 3) Питання стабільності розроблених здобувачем діагностичних показників при роботі двигуна на перехідних режимах (розгін,

зниження навантаження, маневрові режими) потребує більш детального висвітлення.

- 4) Застосування вібродатчиків на магнітній платформі є практично зручним рішенням, однак вплив умов та способу їх встановлення на спектральні характеристики вимірюваного сигналу висвітлено недостатньо.
- 5) Аспекти довготривалої стабільності функціонування розроблених алгоритмів за умов безперервного використання системи діагностики на судні розкрито недостатньо повно. Бажано було б детальніше висвітлити питання надійності роботи алгоритмів при їх тривалому безперервному застосуванні в реальних суднових умовах експлуатації.
- 6) У третьому розділі дисертації алгоритм визначення початкового наближення верхньої мертвої точки (формула 3.20, стор. 177) містить емпіричні коефіцієнти, що потребують налаштування для кожного типу двигуна. Роботу доцільно було б доповнити систематизованими рекомендаціями щодо вибору цих коефіцієнтів для різних класів суднових дизелів.
- 7) Практична реалізація системи *DEPAS 5.0W* є переконливою, проте економічний ефект від її впровадження не підкріплено кількісними показниками.
- 8) Бажано було б більш детально систематизувати порівняння запропонованої методології з комерційними системами діагностики провідних виробників (*Everllence — MAN, Wärtsilä, MAK* та інші), зокрема за основними техніко-експлуатаційними та вартісними показниками.
- 9) Перспективи нормативного закріплення розроблених діагностичних критеріїв та їх стандартизації для використання класифікаційними товариствами розглянуто обмежено.

10. Відповідність дисертації вимогам МОН України

Дисертація відповідає вимогам «Порядку присудження та позбавлення наукового ступеня доктора наук» пункти 7, 8, 9 постанови КМУ від 17 листопада 2021 № 1197 р. зі змінами № 502 від 19.05.2023, № 507 від 03.05.2024, № 928 від 30.07.2025, а також іншим чинним нормам щодо обсягу, наукової новизни, практичної значимості та публікацій.

11. Використання в докторській дисертації матеріалів і висновків кандидатської дисертації здобувача

Матеріали кандидатської дисертації Заложа В.І. на тему «Підвищення ефективності контролю технічного стану транспортних дизелів шляхом використання методу аналітичної синхронізації даних моніторингу» не використані у матеріалах його докторської дисертації.

12. Загальні висновки по дисертаційній роботі

Дисертаційна робота Заложа В.І. «Методологія діагностування судових дизелів за параметрами робочого процесу в реальному часі» є завершеною науковою працею, у якій розв'язано важливу науково-прикладну проблему створення теоретичних та методологічних засад для принципово нової портативної системи діагностування судових дизелів, що забезпечує діагностування за параметрами робочого процесу в режимі реального часу та інтегрується в сучасні цифрові системи.

В роботі розроблено оригінальну методологію діагностування на основі аналізу циклової варіативності робочого процесу, яка дозволяє підвищити оперативність та достовірність визначення технічного стану без втручання в конструкцію систем двигуна. Запропоновані методи та алгоритми реалізовано у портативній системі діагностики *DEPAS 5.0W*, працездатність якої підтверджено в умовах реальної експлуатації.

Дисертація є самостійною завершеною роботою, що має чітку практичну спрямованість. Постановка проблеми, її розв'язання та аналіз отриманих результатів належать особисто автору. Основні положення дисертації опубліковані у наукових працях здобувача, у тому числі у виданнях, що індексуються міжнародною наукометричною базою *Scopus*. Зміст реферату відповідає змісту дисертаційної роботи. Ознак академічного плагіату не виявлено. Зміст дисертації відповідає паспорту спеціальності 05.05.03 – двигуни та енергетичні установки.

Публікації повно відображають результати досліджень. Кількість та якість публікацій відповідають вимогам МОН України. Практичні результати роботи впроваджені у виробництво та навчальний процес, що підтверджено відповідними актами.

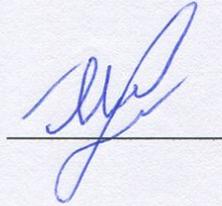
Дисертація виконана на високому науковому рівні, містить результати, що характеризуються новизною та мають практичну цінність для морської галузі. За рівнем наукової новизни, теоретичним та практичним значенням, достовірністю та обґрунтованістю наукових положень, висновків і рекомендацій дисертаційна робота відповідає вимогам «Порядку присудження та позбавлення наукового ступеня

доктора наук» (пункти 7, 8, 9 постанови КМУ від 17 листопада 2021 р. № 1197 зі змінами) та іншим чинним вимогам до дисертацій на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук.

Автор дисертації, **Залож Віталій Іванович**, заслуговує присудження наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.05.03 – двигуни та енергетичні установки.

Офіційний опонент:

доктор технічних наук, професор,
професор кафедри двигунів
внутрішнього згоряння,
установок та технічної
експлуатації Національного
університету кораблебудування
імені адмірала Макарова



Олександр МИТРОФАНОВ

Свідоцтво д.т.н., проф. Олександра Митрофанова засвідчую

Виконаний секретар С.А. Золотка

