

ВІДГУК

опонента Білогуба Олександра Віталійовича на дисертаційну роботу Заложа Віталія Івановича «Методологія діагностування судових 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

Ступінь актуальності обраної теми.

На даний проміжок часу використання судових дизельних двигунів є практично безальтернативним, що зумовлене високою економічністю та можливістю роботи на відносно дешевих сучасних альтернативних паливах, що мінімізують карбоновий слід судна відповідно до вимог Міжнародної морської організації (ІМО). Не слід забувати, що в реальній експлуатації знаходиться велика кількість суден з застарілими на даний час дизельними силовими установками. Слід відзначити, що високий рівень економічності та екологічності судових дизелів безпосередньо залежить від їхнього **технічного стану та налаштування підсистем**, які формують робочий процес. Суднові дизелі є джерелом теплового, шумового та хімічного забруднення навколишнього середовища, а загальні показники їхньої роботи насамперед визначаються умовами протікання робочого процесу в циліндрах. Найбільший вплив на робочий процес судових дизелів здійснюють паливна система високого тиску, система газообміну та технічний стан циліндропоршневої групи (ЦПГ). Отже, для забезпечення ефективного робочого процесу в циліндрах судових дизельних двигунів (СДД) необхідно мати змогу контролювати параметри цих систем і **бажано у реальному часі**.

Діагностування дизельних двигунів за параметрами робочого процесу в реальному часі для оцінки поточного технічного стану критичних вузлів двигуна дозволяє своєчасне виявлення можливих несправностей, запобіганню

виникненню аварійних ситуацій та аварійних зупинок двигунів. Вагома перевага діагностування СДД за параметрами робочого процесу в реальному часі є можливість оцінки стабільності роботи основних систем двигуна, **що неможливо здійснити поза режимом реального часу.**

Науково-прикладна проблема, яку сформулював і вирішує автор «Необхідність створення теоретичних та методологічних засад для принципово нової портативної системи діагностування суднових дизелів, що забезпечує діагностування за параметрами робочого процесу в режимі реального часу та інтегрується в сучасні цифрові системи» подана чітко і однозначно.

Саме тому тема дисертації «Методологія діагностування суднових дизелів за параметрами робочого процесу в реальному часі» є актуальною і практично важливою.

Актуальність підкріплено також тим, що дослідження виконано відповідно до основних положень «Національної транспортної стратегії України на період до 2030 року» (постанова Кабінету Міністрів України від 27 грудня 2024 р. № 1550) та відповідає пріоритетним тематичним напрямкам наукових досліджень в розділі «Енергетика та енергоефективність», затверджених постановою Кабінету Міністрів України № 463 від 9 травня 2023 р., а, також з виконанням ряду НДР – «Підвищення енергоефективності у судноплавстві» (Державний реєстраційний номер: 0118U007606), «Розробка інноваційної технології знезараження і очищення водного баласту суден згідно стандарту якості D-2 міжнародних вимог ІМО Конвенції» (Державний реєстраційний номер: 0123U104285) та «Підвищення ефективності експлуатації морських суден та суден внутрішнього плавання» (Державний реєстраційний номер: 0123U101516), де Залож В.І. є виконавцем підрозділів стосовних параметричній діагностиці транспортних двигунів.

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків та рекомендацій, сформульованих у докторській дисертації базується на

методологічному підході, прийнятому автором для їх отримання, застосуванням фундаментальної теорії дизельних двигунів та систем, що формують робочий процес, а також теорії системного аналізу та синтезу складних технічних систем. Застосовано математичні методи моделювання та аналізу робочого процесу судових дизелів в онлайн-сервісі Blitz-PRO. Широко використані методи експериментальних досліджень робочих процесів дизелів у складі енергетичних об'єктів морського транспорту. Застосовано методи аналізу і синтезу робочого процесу при зіставленні розрахункових і експериментальних результатів, отриманих у режимі реального часу. Результати роботи представлені науковій спільноті для обговорення, отримані позитивні оцінки при апробаціях на науково-технічних конференціях різного рівня.

Новизна і загальнонаціональне або світове значення наукових положень, висновків та рекомендацій, сформульованих у дисертації

Новизна наукових положень, висновків та рекомендацій, сформульованих у дисертації характеризується трьома рівнями, а саме, **вперше** отриманих, **вдосконалених** та тих, що отримали **подальший розвиток**, що підтверджується сукупністю якісних та кількісних показників відмінностей зазначених в публікаціях, які зараховані за темою дисертації та не викликають сумнівів.

Згідно порядку викладення в дисертації новизни результатів та наукових положень, обґрунтування їх значення наступне:

Для рівня – «вперше»

– Науковий результат №1. Розроблено методи діагностування судових дизелів, які дають змогу оцінювати варіативність процесів згоряння палива, фаз паливоподачі та газорозподілу у послідовних робочих циклах. [1, 3, 6, 7, 9, 14, 23, 24, 25, 26, 30, 31], Тут і далі – посилання на список використаних джерел дисертації.

- Науковий результат №2. Розроблено комплексний показник оцінки нерегулярності робочих циклів (CI_p - cycle irregularity index), який враховує середнє та максимальнє значення коефіцієнта варіації тиску в циліндрі. [1, 7, 9, 24].
- Науковий результат №3. Розроблено метод аналізу зміни коефіцієнта варіації тиску в робочому циліндрі двигуна по куту повороту колінчастого валу (COV_{Pi}). [1, 7, 9, 25].
- Науковий результат №4 Розроблено метод аналізу варіації фаз подачі палива, включаючи кути початку ($\Delta\phi_{adv}$), тривалості впорскування палива ($\Delta\phi_{inj}$) та фаз газорозподілу ($\Delta\phi_{valves}$). [1, 3, 6, 7, 9, 14, 26, 30, 31].

Для рівня – «вдосконалено»

- Методику взаємної оцінки робочих процесів та вібраційних діаграм паливної апаратури високого тиску та механізму газорозподілу, що дозволило розробити алгоритми діагностики відповідних систем двигунів у реальному часі за рахунок зменшення впливу шумів вібродіаграми. Зменшення впливу шумів здійснено завдяки підвищенню порядку фільтра *Butterworth* до 11-го порядку ($n = 11$), та збільшенню частоти зрізу (*the cutoff frequency* $f_c = 15...17$ кГц). [3, 4, 6, 17, 32, 33, 44, 45].
- Алгоритм визначення ВМТ 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. На сьогодні використання вдосконаленого алгоритму є актуальним для технічної діагностики до 40% сучасних судових дизелів. [8, 20, 21, 22, 37, 43, 47, 48].

Для рівня – «отримало подальший розвиток»

- Метод визначення технічного стану двигунів на основі

співставлення діагностичних параметрів з даними морських випробувань *Sea Trials*. [4, 32, 33, 38, 45].

- Метод визначення параметрів варіативності поточного режиму експлуатації двигуна за допомогою розвинутого математичного моделювання робочих процесів реалізованого в онлайн-сервісі *Blitz-PRO*. [2, 4, 11].

На погляд опонента наукова новизна представлених автором наукових положень міститься у наступному:

1. Розроблено методи діагностування судових дизелів, які дають змогу оцінювати варіативність процесів згоряння палива, фаз паливоподачі та газорозподілу у послідовних робочих циклах та розроблено **комплексний критерій** оцінки нерегулярності робочих циклів (CII_p - *cycle irregularity index*), який враховує середнє та максимальне значення коефіцієнта варіації тиску в циліндрі, що забезпечує інтегральну оцінку варіативності робочого процесу. Розроблені метод та критерій дають можливість регулювати двигун та аналізувати результати налаштування систем, які впливають на процеси згоряння палива безпосередньо під час експлуатації, підвищуючи точність, оперативність і ефективність діагностичного контролю.
2. Розроблено метод аналізу варіації фаз подачі палива, включаючи кути початку ($\Delta\phi_{adv}$), тривалості впорскування палива ($\Delta\phi_{inj}$) та фаз газорозподілу ($\Delta\phi_{valves}$), що дозволяє аналізувати циклові зміни фактичних фаз подачі палива та газорозподілу та дає змогу оцінювати стабільність роботи паливної апаратури високого тиску та механізму газорозподілу.
3. Запропоновано новий алгоритм визначення ВМТ 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 сучасних судових дизелів.

4. Суттєво модифіковано методику взаємної оцінки робочих процесів та вібраційних діаграм паливної апаратури високого тиску та механізму газорозподілу, що дозволило розробити алгоритми діагностики відповідних систем двигунів у реальному часі за рахунок зменшення впливу шумів вібродіаграми. Зменшення впливу шумів здійснено завдяки підвищенню порядку фільтра *Butterworth* до 11-го порядку ($n = 11$), та збільшенню частоти зрізу (*the cutoff frequency* $f_c = 15...17$ кГц).
5. Розвинено методи визначення технічного стану двигунів на основі співставлення діагностичних параметрів з даними морських випробувань *Sea Trials* та визначення параметрів варіативності поточного режиму експлуатації двигуна за допомогою розвинутого математичного моделювання робочих процесів реалізованого в онлайн-сервісі *Blitz-PRO*

Загальнонаціональне значення наукових положень, висновків та рекомендацій, сформульованих у дисертації ґрунтується на потребі цих результатів для вирішення актуальної проблеми зниження глобальної витрати палива і викидів парникових компонент відпрацьованих газів (CO_2) в морській і річковій логістиці за рахунок діагностики існуючого парку СДД в режимі реального часу.

Практична цінність роботи в першу чергу полягає в участі при створенні сучасного діагностичного комплексу *DEPAS D5.0W*, що працює в режимі реального часу.

Практична складова наукових результатів підтверджена впровадженням в програмному забезпеченні системі діагностування *DEPAS D5.0W*, морській сервісній компанії MARIQ SERVICE, діагностуванні двигунів ГД 6VDS 42/48, Wartsila 6L20 т/х «Kaunas» та «Vilnius».

Слід також згадати впровадження результатів дисертації в навчальних процесах Одеського національного морського університету та Дунайського інституту Національного університету «Одеська морська академія» (м. Ізмаїл).

Повнота викладу в наукових публікаціях результатів за темою дисертації

Результати і наукові положення дисертаційної роботи достатньо повно відображені в 22 статтях з яких 1 – в *Scopus Q1*, 4 – в *Scopus Q2*, 1 в – *Scopus Q4*.

Представлено 27 тез доповідей на міжнародних та Українських науково-технічних конференціях.

Оцінка змісту дисертації, її завершеність в цілому.

Дисертація складається зі вступу, п'яти розділів, висновку, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг роботи – 429 сторінок друкованого тексту, обсяг основного тексту – 300 сторінок. Дисертація містить 115 рисунків та 24 таблиці, з яких 5 рисунків та 3 таблиці повністю займають площу сторінки, список використаної літератури включає 228 джерел на 29 сторінках, додатки розміщені на 99 сторінках.

У **вступі** обґрунтовані актуальність дослідження, наукова проблема, поставлені мета та задачі, визначені предмет та об'єкт дослідження, сформовані наукова та практична новизна роботи, наведені відомості щодо її апробації та структури.

У **першому розділі** проаналізовані і систематизовані існуючі сучасні системи діагностики робочого процесу суднових дизельних двигунів за їх функціональним призначенням та способом реалізації. Досліджено перспективи розвитку систем діагностики в контексті Індустрії 4.0, включаючи застосування цифрових двійників, хмарних технологій, бездротових сенсорних мереж та інтелектуального аналізу даних. Запропонована концептуальна модель діагностичної системи нового покоління, що інтегрує технології Індустрії 4.0 для діагностики суднових дизелів.

У **другому розділі** складено технологічну карту дослідження за методологією професора І. І. Кринецького, визначені головні та допоміжні

задачі, визначені критерії оцінки отриманих результатів. Розроблено та теоретично обґрунтовано методи діагностування суднових дизелів у режимі реального часу. Запропоновано метод аналізу зміни коефіцієнта варіації тиску в робочому циліндрі, який на відміну від існуючих підходів, дозволяє оцінювати варіативність робочих циклів у режимі реального часу. Розроблено комплексний показник оцінки нерегулярності робочих циклів (*cycle irregularity index, CII_p*), що забезпечує узагальнену характеристику циклової варіативності та враховує як максимальне, так і середнє значення коефіцієнта варіації. Розроблено метод визначення коефіцієнта варіації фаз подачі палива, зокрема кутів початку та тривалості впорскування палива та коефіцієнта варіації фаз газорозподілу за кутами закриття клапанів, контроль яких пропонується здійснювати за допомогою вібраційного датчика.

Запропоновано використовувати систему граничних значень циклової варіативності з кольоровим маркуванням (зелений, жовтий, червоний діапазони).

Розроблені теоретичні основи стали підґрунтям для створення системи діагностики морських дизельних двигунів реального часу, що забезпечує оперативне виявлення змін у робочих параметрах двигуна та дозволяє виконувати налаштування відповідних механізмів безпосередньо під час експлуатації.

У **третьому розділі** розроблено науково-методологічні основи підвищення точності визначення верхньої мертвої точки (ВМТ) поршня та синхронізації даних для діагностики робочого процесу дизелів.

У **четвертому розділі** наведено технологію моделювання типових несправностей двигуна та підтвердження ефективності розроблених діагностичних методів з використанням спеціалізованого розрахункового онлайн-сервісу *Blitz-PRO*. Обґрунтовано діапазони значень критеріїв циклової варіативності, що базуються на вимогах морських кваліфікаційних товариств. Проведено ідентифікацію несправностей на основі математичного

моделювання в онлайн-сервісі *Blitz-PRO*. Показано систему діагностики, розроблену з застосуванням попередніх тверджень. Показано, що ключова перевага запропонованої системи індиціювання та діагностики морських двигунів порівняно з існуючими на ринку аналогами полягає у можливості здійснювати налаштування двигуна в режимі реального часу безпосередньо під час його експлуатації. У реальному часі можливий контроль навантаження циліндрів N_i , контроль середнього індикаторного тиску, основних точок тиску P_{max} , P_{comp} , P_{ign} , а також оцінка нестабільності подачі палива та процесу згоряння палива в робочих циліндрах.

У п'ятому розділі висвітлено практичне застосування розроблених методів для створення системи діагностування суднових дизелів у режимі реального часу.

Розроблені методи оцінки варіативності якості згоряння палива, фаз подачі палива та газорозподілу у послідовних робочих циклах впроваджено в нову версію програмного забезпечення системи діагностики реального часу *DEPAS 5.0W*, яка створена в ОНМУ під науковим керівництвом професора Варбанця Р. А. Показано запропоновану концепцію та структуру системи, що включає датчик тиску, вібраційний датчик на магнітній платформі, вимірювальний блок з бездротовою передачею даних та програмне забезпечення для мобільного пристрою. Ключовою відмінністю запропонованої технології від існуючих систем є можливість одночасної реєстрації сигналів тиску у циліндрі та вібраційних сигналів з подальшим синхронним аналізом отриманих даних безпосередньо під час роботи двигуна. Унікальною особливістю розробленої технології є можливість проведення діагностики без зупинки двигуна та внесення змін у його конструкцію, що відповідає вимогам неруйнівного контролю, прийнятим у морській галузі. Система забезпечує точність вимірювання тиску з похибкою не більше 1,5 %, а фазових характеристик з точністю до $0,3^\circ$ ПКВ, що перевищує вимоги класифікаційних товариств.

Зміст автореферату відповідає змісту дисертації.

Оцінюючи зміст дисертації в цілому, можна відзначити, що поставлені в роботі задачі вирішені, всі розділи дисертації супроводжуються окремими висновками. Висновки до розділів і підсумкові висновки містять науково обґрунтовані дані, які дозволяють ствердити, що **важлива науково-прикладна проблема створення теоретичних та методологічних засад для принципово нової портативної системи діагностування технічного стану суднових дизелів, вирішена** і дозволяє підвищити ефективність експлуатації суднових дизельних двигунів за рахунок створення портативних діагностичних системи нового покоління реального часу та отримувати вичерпну діагностичну інформацію щодо поточного стану двигуна.

Відсутність академічного плагіату, фабрикації, фальсифікації підтверджується змістом дисертації, наданих наукових публікацій та звітом детектору плагіату (<https://plagiarism-detector.com>) від 16.01.2026 р., в якому оригінальність тексту поданого автором визнана на 92,5 %.

Оприлюдненні наукові результати автора є результатами власного дослідження і не належать іншим особам. При цьому в дисертації і наукових публікаціях, у разі посилань на наукові результати, наукові тексти, ідеї, розробки і матеріали інших авторів, вони супроводжуються обов'язковим посиланням на автора та на джерело опублікування.

Щодо спільних наукових публікацій, в яких висвітлені основні наукові результати, цей факт відзначається з зазначенням особистого внеску на сторінках 37-38 дисертації.

Зауваження та/або дискусійні питання стосовно положень докторської дисертації.

1. У першому розділі дисертаційної роботи автор в переліку впливів на робочий процес окрім паливної системи і системи газорозподілення називає стан циліндропоршневої групи (с.41), але в подальшому цей вплив розглядається тільки як зниження компресії (с.134). Потребує пояснення, чому в реалізаціях (*DEPAS D5.0W*) немає діагностування стану ЦПГ.
2. При огляді робіт по діагностиці увагу приділено виключно поршневим двигунам, хоча в суміжних галузях, наприклад авіаційних ГТД, широко

застосовується і параметрична і вібродіагностика. Було-б доцільно розширити межі бібліографічних досліджень.

3. При огляді систем діагностування (підрозділи 1.2.1, 1.2.2) немає даних про вартість тієї чи іншої системи, що дає неповну інформацію про доцільність використання. В подальшому питання економічної доцільності використання тієї чи іншої системи не розглядається, що знижує інформативність подачі матеріалу.
4. Наведена карта дисертаційного дослідження за І.І. Кринецьким (рис. 2.1, с. 104) передбачає зворотній зв'язок по результатах («виходу» зі «входом»). В подальшому вплив «виходу» на «вхід» ніде не прослідковується – впровадження ніяк не змінили постановку задач. На мій погляд вирішено послідовну процедуру дослідження без «ітерацій» і технологічна карта в такій редакції хибна.
5. В розділі 2.2 (с. 106...111) щодо варіативності робочих циклів доцільно було-б класифікувати її по причинах і виділити ті роботи, на які в подальшому спирається автор – варіативність пов'язану з паливною апаратурою і МГР.
6. На с.116 вказано на необхідність забезпечення сталого навантажувального режиму. Не зрозуміло яка вибірка послідовних циклів по цьому показнику буде визнана коректною для подальшого використання. Як в подальшому визначається, що навантаження стає?
7. Для розширення застосування даних випробувань *Sea Trials* автор пропонує користуватися поліноміальними апроксимаціями. Не зрозуміло, як визначити порядок полінома. На прикладі з турбокомпресором він 3-го порядку (с.143, табл. 9), а може достатньо 2-го? .
8. В підрозділі 2.10 запропоновано методику діагностування турбокомпресора на основі аналізу віброакустичного сигналу. Не зрозуміло, як проводити діагностику не маючи акустичного паспорту справного виробу.
9. В розділі 3 було-б доцільно навести повний алгоритм визначення ВМТ у вигляді блок-схеми.
10. В підрозділі 4.2 не наведено даних щодо похибок моделювання в сервісі

Blitz-PRO порівняно з даними випробувань *Sea Trials* двигуна *MAN 7S50MC*.

11. На с.268, рис. 5.17 наведено порівняння параметрів двигуна з еталонним станом зі станом з відхиленнями. Не зрозуміло чи це результати фізичного експерименту, чи моделювання.
12. Не зрозуміло, які інструкції повинен мати судновий механік, щоб за протоколами діагностування визначити причини відхилень від штатної роботи двигуна?

Висловлені зауваження носять дискусійний характер та направлені на вдосконалення подальшої роботи здобувача і не зменшують значимість отриманих результатів та не впливають на загальну позитивну оцінку дисертаційної роботи.

Загальний висновок щодо відповідності дисертації встановленим вимогам.

На основі вивчення представлених Заложем Віталієм Івановичем матеріалів докторської дисертації «Методологія діагностування суднових дизелів за параметрами робочого процесу в реальному часі» та наданих наукових публікацій вважаю, що вона повністю відповідає вимогам пунктів 7, 8, 9 «Порядку присудження та позбавлення наукового ступеня доктора наук», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 17 листопада 2021 року № 1197, а саме:

- є завершеною кваліфікаційною науковою працею, виконаною здобувачем самостійно; містить наукові положення та нові науково обґрунтовані результати у галузі поршневого двигунобудування, зокрема діагностики суднових енергоустановок, які мають практичну та теоретичну цінність та які підтверджуються актами впровадження (додаток А);
- відповідає паспорту спеціальності 05.05.03 – двигуни та енергетичні установки за напрямками досліджень «Фізичне та математичне моделювання, системний аналіз і синтез термодинамічних, гідродинамічних, газодинамічних, електродинамічних, електрохімічних та інших процесів у двигунах, енергоустановках і їх елементах» та

- «Розроблення засобів, моделей, методів і методик для ідентифікації та діагностичного контролю технічного стану двигунів і енергоустановок»;
- містить обґрунтовані висновки на основі одержаних здобувачем достовірних результатів, характеризується єдністю змісту, відповідає принципам академічної доброчесності, повністю висвітлена у наукових публікаціях, та пройшла апробацію на наукових конференціях та конгресах;
 - наукові результати і матеріали інших авторів супроводжується обов'язковим посиланням на автора та/або на джерело опублікування.

Наведені зауваження не впливають на загальну позитивну оцінку роботи, а її автор Залож Віталій Іванович заслуговує на присудження наукового ступеня доктора технічних наук зі спеціальності 05.05.03 – двигуни та енергетичні установки.

Професор кафедри конструкції авіаційних двигунів Національного аерокосмічного університету «Харківський авіаційний інститут», д-р техн. наук, професор

Олександр БІЛОГУБ

ПІДПИС *Олександр Білогуб*
ЗАСВІДЧУЮ
Учений секретар університету

