

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ОДЕСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ МОРСЬКИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ЗАЛОЖ ВІТАЛІЙ ІВАНОВИЧ



УДК 629.083+621.431

**МЕТОДОЛОГІЯ ДІАГНОСТУВАННЯ
СУДНОВИХ ДИЗЕЛІВ ЗА ПАРАМЕТРАМИ
РОБОЧОГО ПРОЦЕСУ В РЕАЛЬНОМУ ЧАСІ**

Спеціальність 05.05.03 – двигуни та енергетичні установки

Реферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Одеса – 2026

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Дунайському інституті Національного університету «Одеська морська академія» Міністерства освіти і науки України.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Білогуб Олександр Віталійович,
Національний аерокосмічний університет
«Харківський авіаційний інститут», професор
кафедри конструкції авіаційних двигунів, м. Харків;

доктор технічних наук, професор
Митрофанов Олександр Сергійович
Національний університет кораблебудування імені
адмірала Макарова, професор кафедри двигунів
внутрішнього згоряння, установок та технічної
експлуатації, м. Миколаїв;

доктор технічних наук, професор
Тимощук Олена Миколаївна,
Навчально-науковий Київський інститут водного
транспорту імені гетьмана Петра Конашевича-
Сагайдачного Національного транспортного
університету, в.о. директора, професор кафедри
навігації і управління суднами, м. Київ

Захист відбудеться «06» березня 2026 р. об 11⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 41.060.02 в Одеському національному морському університеті за адресою: 65029, м. Одеса, вул. Мечникова, 34.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Одеського національного морського університету за адресою: 65029, м. Одеса, вул. Мечникова, 34, та за електронною адресою: <https://www.onmu.org.ua/ua/spetsializovana-vchena-rada-d-41-060-02/plan-pro-zakhistiv-i-materiali-disertatsijnikh-doslidzhen-4.html>

Дата розміщення реферату на офіційному веб-сайті ОНМУ 20 лютого 2026 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради Д 41.060.02,
к.т.н., доцент



О. В. Єриганов

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Обґрунтування вибору теми та актуальність дослідження. Використання двигунів внутрішнього згоряння на морському транспорті є безальтернативним як на сьогодні, так і в осяжному майбутньому. Суднові дизельні двигуни (СДД) використовуються в якості головних для руху судна та допоміжних у вигляді дизель-генераторів. Їх безальтернативне використання зумовлене високою економічністю та можливістю роботи на відносно дешевих сучасних альтернативних паливах, що мінімізують карбоновий слід судна відповідно до вимог Міжнародної морської організації (ІМО).

Відомо, що високий рівень економічності та екологічності суднових 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. Відомо, що найбільший вплив на робочий процес суднових дизелів здійснюють паливна система високого тиску, система газообміну та технічний стан циліндропоршневої групи (ЦПГ). Отже, для забезпечення ефективного робочого процесу в циліндрах СДД необхідно мати змогу контролювати параметри цих систем у реальному часі, що **визначає запит практики**. На основі діагностування дизельних двигунів за параметрами робочого процесу в реальному часі можливо здійснювати оцінку поточного технічного стану вказаних вузлів двигуна, своєчасно виявляти й ліквідувати можливі несправності, запобігати виникненню аварійних ситуацій та аварійних зупинок двигунів, що можуть привести до важких наслідків (таких як «*blackout*» – повна відсутність електропостачання судна). Однією з вагомих переваг діагностування СДД за параметрами робочого процесу в реальному часі є можливість оцінки стабільності роботи основних систем двигуна, що неможливо здійснити поза режимом реального часу.

Поточні технології та методи діагностування технічного стану суднових дизелів базуються на науково-технічних і технологічних рішеннях третьої промислової революції, наслідком чого є використання методів відкладеного аналізу. Недостатня ефективність таких методів унеможлиблює отримання необхідного обсягу інформації щодо ефективної експлуатації СДД відповідно до сучасних вимог ІМО. У відповідності до базових засад четвертої промислової революції (Індустрії 4.0), ефективним шляхом розв'язання вказаної **проблеми** є використання методів діагностування суднових дизелів за параметрами робочого процесу в реальному часі із застосуванням математичного і фізичного моделювання. Спираючись на експериментальні дані реального часу, можливо отримати необхідну інформацію щодо поточного стану двигуна та ефективності роботи систем паливоподачі, газообміну та циліндропоршневої групи на будь-яких режимах експлуатації.

Отже, тема дослідження, що присвячена методології діагностування технічного стану суднових дизелів за параметрами робочого процесу в реальному часі з використанням сучасних цифрових технологій на основі математичних моделей та їх реалізація у спеціальних мобільних засобах, пристосованих до

використання в умовах експлуатації, є **актуальною**.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. 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.

Дисертаційна робота пов'язана з тематиками досліджень кафедри інженерних дисциплін Дунайського інституту Національного університету «Одеська морська академія» та спрямована на розробку методів діагностування технічного стану судових дизелів за параметрами робочого процесу в реальному часі. Наведені в дисертації матеріали узагальнюють результати досліджень, виконаних автором у рамках науково-дослідних робіт «Підвищення енергоефективності у судноплаванні» (Державний реєстраційний номер: 0118U007606) та «Підвищення ефективності експлуатації морських суден та суден внутрішнього плавання» (Державний реєстраційний номер: 0123U101516) в якості співвиконавця розділів, присвячених методам параметричної діагностики транспортних двигунів; «Розробка інноваційної технології знезараження і очищення водного баласту суден згідно стандарту якості D-2 міжнародних вимог ІМО Конвенції» (Державний реєстраційний номер: 0123U104285) в рамках білатерального міжнародного наукового співробітництва з Турецькою Республікою, в яких автора представлено відповідальним виконавцем.

Робота виконана в межах тематики досліджень кафедри судових енергетичних систем і комплексів (судових енергетичних установок та технічної експлуатації) Одеського національного морського університету за 2021-2023 рр. «Підвищення ефективності експлуатації судової енергетичної установки» (Державний реєстраційний номер: 0122U001539), в якій здобувач займався розробкою методів функціонування системи моніторингу та діагностики судових дизелів у режимі реального часу в умовах експлуатації.

Науково-прикладною проблемою, яка вирішується в дисертаційній роботі є необхідність 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. Зазначена проблема є частиною глобальної науково-прикладної проблеми, яка полягає у забезпеченні безпечного судноплавства, підвищенні ефективності використання палива на судах та зменшенні шкідливого впливу на довкілля при експлуатації флоту. Основним *науковим протиріччям* є суперечність між необхідністю отримувати високоточну, швидкодіючу та інформативну діагностичну інформацію про робочі процеси судового дизельного двигуна в реальному часі та обмеженнями портативних діагностичних засобів щодо обчислювальних ресурсів, пропускну здатності каналів зв'язку, енергоспоживання та кількості доступних діагностичних параметрів.

Мета і завдання дослідження. Мета роботи полягає у розробленні методології діагностування технічного стану судових дизелів у режимі реального часу, яка дозволить підвищити обсяг і достовірність діагностичної інформації, включно з показниками циклової варіативності робочого процесу.

Досягнення мети пов'язане з комплексним розв'язанням наступних задач наукового дослідження:

- аналіз існуючих методів та засобів діагностування суднових дизелів за параметрами робочого процесу та розробка науково обґрунтованої стратегії підвищення ефективності діагностичного контролю у контексті четвертої промислової революції.

- аналіз циклової варіативності робочого процесу як діагностичної ознаки технічного стану суднових дизелів та розробка методу аналізу зміни коефіцієнта варіації тиску в робочому циліндрі за кутом повороту колінчастого валу.

- розробка методу аналізу варіації фаз подачі палива, зокрема кутів початку та тривалості впорскування палива, а також фаз газорозподілу за кутами закриття клапанів, на основі сигналів вібраційного датчика.

- розробка комплексного показника оцінки циклової варіативності робочого процесу для задач технічної діагностики суднових дизелів.

- удосконалення алгоритму визначення ВМТ поршня і подальшої синхронізації даних за відсутності інформації про фактичний ступінь стиснення в циліндрі та тиск наддувочного повітря.

- удосконалення методики взаємної оцінки робочих процесів та вібраційних діаграм паливної апаратури високого тиску та механізму газорозподілу.

- розвиток методу визначення поточного технічного стану двигунів на основі співставлення діагностичних параметрів з даними морських випробувань *Sea Trials*.

- розвиток методу визначення параметрів варіативності поточного режиму експлуатації двигуна за допомогою математичного моделювання робочих процесів реалізованого в онлайн-сервісі *Blitz-PRO*.

Об'єктом дослідження є процес зміни технічного стану суднових дизелів під час експлуатації.

Предметом дослідження є методи діагностування технічного стану суднових дизелів за параметрами робочого процесу в режимі реального часу.

Методи дослідження. Робота виконана із 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 суднових 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.

Для визначення основних параметрів робочого процесу використовуються методи чисельної обробки даних діагностики, включаючи методи чисельного диференціювання та цифрової фільтрації на базі дискретного перетворення Фур'є.

В експериментах використовувалися методи визначення параметрів робочого процесу суднових дизелів за допомогою системи діагностики *DEPAS 5.0W*. При розробці алгоритмів використовувалось моделювання робочого процесу в онлайн-сервісі *Blitz-PRO* та математичні бібліотеки *MathToolbox*, компільовані в середовищі *Delphi*. Для візуалізації даних і побудови регресійних моделей використовувалось середовище *Grapher*.

Наукова новизна отриманих результатів, які захищає автор, полягає у наступному.

Вперше:

– Розроблено методи діагностування суднових дизелів, які дають змогу оцінювати варіативність процесів згоряння палива, фаз паливоподачі та газорозподілу у послідовних робочих циклах. Раніше таке завдання не ставилося та не вирішувалося в існуючих системах діагностування морських дизелів. Розроблені методи дають можливість регулювати двигун та аналізувати результати налаштування систем, які впливають на процеси згоряння палива, безпосередньо під час експлуатації, підвищуючи оперативність і ефективність діагностичного контролю, що відзначено у відгуках технічних фахівців судноплавних компаній та морських товариств, які експлуатували розроблену автором систему.

– Розроблено комплексний показник оцінки нерегулярності робочих циклів (CI_p - *cycle irregularity index*), який враховує середнє та максимальне значення коефіцієнта варіації тиску в циліндрі. На відміну від існуючих показників, CI_p забезпечує інтегральну оцінку варіативності робочого процесу. Комплексний показник CI_p дає змогу підвищити достовірність технічної діагностики судового дизеля загалом, будучи єдиним сукупним показником числової оцінки технічного стану основних систем двигуна. Шляхом чисельного моделювання та аналізу експериментально отриманих значень параметрів судового дизеля в онлайн-сервісі *Blitz-PRO* встановлено діапазони значень CI_p , для яких зміна індикаторної потужності N_i відбувається в межах: до 2 % (зелений сектор – нормальний стан); 2...3 % (жовтий сектор – потребує підвищеної уваги); більше 3 % (червоний сектор – незадовільний стан).

– Розроблено метод аналізу зміни коефіцієнта варіації тиску в робочому циліндрі двигуна по куту повороту колінчастого валу (COV_{P_i}). 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.

– Розроблено метод аналізу варіації фаз подачі палива, включаючи кути початку ($\Delta\phi_{adv}$), тривалості впорскування палива ($\Delta\phi_{inj}$) та фаз газорозподілу ($\Delta\phi_{valves}$). На відміну від існуючих методів, запропонований підхід дозволяє аналізувати циклові зміни фактичних фаз подачі палива та газорозподілу, що дає змогу оцінювати стабільність роботи паливної апаратури високого тиску та механізму газорозподілу.

Удосконалено:

– 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).

– 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 суднових дизелів.

Отримало подальший розвиток:

– Метод визначення технічного стану двигунів на основі співставлення діагностичних параметрів з даними морських випробувань *Sea Trials*.

– Метод визначення параметрів варіативності поточного режиму експлуатації двигуна за допомогою розвинутого математичного моделювання робочих процесів реалізованого в онлайн-сервісі *Blitz-PRO*.

Практичне значення отриманих результатів полягає в розробці методів та алгоритмів функціонування принципово нової системи діагностування суднових дизелів в режимі реального часу. Розроблені в дисертації методи дозволяють створити портативні діагностичні системи нового покоління та підвищити ефективність експлуатації суднових дизелів, отримуючи інформацію щодо якості робочого процесу у циліндрах та вичерпну інформацію щодо ефективності функціонування критично важливих систем: паливopoдачі, газообміну та циліндропошневої групи на різних режимах експлуатації.

Методи діагностування суднових дизелів, які дають змогу оцінювати варіативність якості згоряння палива, фаз подачі палива та газорозподілу у послідовних робочих циклах імплементовані в нову версію програмного забезпечення системи діагностики *DEPAS 5.0W*.

Результати дисертаційної роботи впроваджені в навчальний процес кафедри суднових енергетичних систем та комплексів Навчально-наукового інституту морського флоту Одеського національного морського університету (м. Одеса), кафедри інженерних дисциплін Дунайського інституту Національного університету «Одеська морська академія» (м. Ізмаїл). Практичне впровадження результатів дисертаційної роботи реалізовано для діагностики головних та допоміжних двигунів теплоходів «*Vilnius*», «*Kaunas*» ТОВ судноплавної компанії «Укрферрі» (м. Одеса) та в морській сервісній компанії *Mariq Service* (м. Гамільтон, Канада).

Особистий внесок здобувача полягає в висуненні та доведенні гіпотези, що застосування методів діагностування технічного стану ДВЗ в реальному часі дозволяє підвищити економічну та екологічну ефективність експлуатації суднових дизелів, знизити рівень шкідливих викидів та загальний рівень вібрації. Розробка методології діагностування суднових дизелів за параметрами робочого процесу в реальному часі; методів, що дозволили створити принципово нову систему діагностування суднових дизелів. Внесок здобувача полягає у самостійному формулюванні мети й завдань, об'єкта та предмета дослідження, аналізі літературних джерел, у вдосконаленні та розробленні дослідницьких методик та проведенні експериментальних досліджень. Особистий внесок здобувача включає також оброблення експериментальних даних, систематизацію отриманих результатів, ідентифікацію й моделювання найпоширеніших несправностей систем паливopoдачі і газорозподілу суднових дизелів та розроблення висновків. Дисертація є самостійною роботою автора.

Апробація результатів дисертації. Результати роботи доповідались на міжнародних конференціях, конгресах та семінарах, серед яких: XXV-XXX

Міжнародний конгрес двигунобудівників, II-VI Міжнародна морська науково-практична конференція кафедри СЕУ і ТЕ *MPP&O* (ОНМУ, Одеса, 2020-2025 рр.), 11-15 Міжнародна науково-практична конференція «Сучасні енергетичні установки на транспорті, технології та обладнання для їх обслуговування СЕУТТОО» (ХДМА, Херсон, 2020-2024 рр.), X Міжнародна науково-технічна конференція «Суднова енергетика: стан та проблеми» (НУК ім. адмірала Макарова, Миколаїв, 2021 р.), XIII Міжнародна науково-технічна конференція «Інновації в суднобудуванні та океанотехніці» (НУК ім. адмірала Макарова, Миколаїв, 2022 р.), 7-8 Міжнародна наукова конференція *SEA-CONF* (Констанца, Румунія, 2021-2022 рр.), XI-XV Міжнародна науково-практична конференція «Сучасні підходи до високоєфективного використання засобів транспорту ДІНУОМА» (ДІНУОМА, Ізмаїл, 2020-2024 рр.), VI-IX Міжнародна науково-практична конференція «Інноваційні підходи до розвитку компетентнісних якостей фахівців в умовах професійного становлення» (ДІНУОМА, Ізмаїл, 2022-2025 рр.), I Міжнародна науково-технічна конференція «Прогресивні технології засобів транспорту» (УкрДУЗТ, Харків-Миргород, 2021 р.), Міжнародна науково-практична конференція «ДНІПРОВСЬКІ ЧИТАННЯ-2020» (ДУІТ, Київ, 2020 р.).

Публікації. Результати дисертаційного дослідження опубліковані в 49 працях, в тому числі: 22 наукові статті у фахових журналах України та інших держав, серед яких 6 статей в журналах, що входять до міжнародної наукометричної бази *Scopus* (Q_1 – 1 стаття, Q_2 – 4 статті, Q_4 – 1 стаття); 27 тез доповідей міжнародних конференцій.

Структура та об'єм роботи. 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.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовані актуальність дослідження, наукова проблема, яка потребує вирішення, 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 судових дизельних двигунів за їх функціональним призначенням та способом реалізації. Виділено чотири основні групи систем: стаціонарні системи реального часу, стаціонарні системи відкладеної діагностики, портативні системи реального часу та портативні системи відкладеної діагностики. Детально розглянуто принципи роботи, конструктивні особливості та функціональні можливості найбільш поширених сучасних систем, таких як *DEPAS D4.0H*, *IMES EPM-XP*, *SMT Premet[®] X*, *LEMAG ECI*, *MAN B&W PMI*, *Icon Research*, *MARPrime Ultra* тощо.

Особливу увагу приділено методам діагностики паливної апаратури, роботи форсунки та приводу клапанів газорозподілу за допомогою віброакустичного аналізу. Продемонстровано ефективність застосування вібродатчиків на магнітній платформі для неруйнівного контролю параметрів при діагностуванні морських двигунів. Розглянуто методіку паралельного аналізу індикаторних діаграм та вібродіаграм для точного визначення причин дефектів паливної апаратури високого тиску та механізму керування клапанами газорозподілу.

В контексті зростання вимог до ефективності, надійності та безпеки суднових дизельних двигунів акцентується увага на необхідності впровадження сучасних та перспективних технологій діагностики дизелів за параметрами робочого процесу, тобто систем, які працюють в режимі реального часу. Такі системи забезпечують оперативне виявлення змін у робочих параметрах дизельних двигунів, дозволяючи операторам швидко ідентифікувати потенційні несправності та реагувати на них. Принципова відмінність системи діагностики реального часу від існуючих аналогів полягає в її здатності забезпечувати налаштування параметрів двигуна безпосередньо під час його експлуатації. У режимі реального часу можливий контроль навантаження циліндрів, середній індикаторний тиск, характеристичні точки робочого процесу.

Досліджено перспективи розвитку систем діагностики в контексті Індустрії 4.0, включаючи застосування технологій штучного інтелекту, 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. Проведено аналіз публікацій, присвячених проблемі варіативності робочих циклів дизельних двигунів, що дозволило систематизувати основні причини та механізми виникнення циклової варіативності. Варіативність робочих циклів переважно виникає через функціонування двох критично важливих систем двигуна, що відповідають за якість згоряння палива у циліндрі: системою високого тиску подачі палива та системою керування газорозподільними клапанами. Варіативність робочих циклів значною мірою обумовлена коливаннями в системі подачі палива. Ці коливання проявляються через варіації об'єму впорскуваного палива в кожному циклі, кута випередження подачі палива φ_{adv} , а також змінну тривалість самого процесу впорскування φ_{inj} . Подібні коливання призводять до змін ключових робочих параметрів двигуна в кожному циклі. Зокрема, спостерігаються відхилення середнього індикаторного тиску MIP та індикаторної потужності N_i , що негативно впливає на експлуатаційні характеристики. При цьому зміни індикаторної потужності циліндра майже прямо пропорційні відсотковому відхиленню циклової подачі палива. В результаті це призводить до посилення вібраційного навантаження та зниження ефективного ККД двигуна.

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.

Вимірювання та аналіз тиску в циліндрі впродовж послідовних робочих циклів дозволяє проводити порівняльну оцінку параметрів на ділянках стиснення та згоряння з подальшою кількісною оцінкою виявлених відхилень. Для аналізу візьмемо серію з m індикаторних діаграм ($j=1\dots m$), отриманих за умови сталого навантаження головного двигуна 6S60MC-C, див. рис. 1. Максимальний тиск для j -го циклу $P_{max j}$ та усереднений максимальний тиск за всі m циклів $\overline{P_{max}}$ визначаються як:

$$P_{max j} = \max(P_{ij}); \overline{P_{max}} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m P_{max ij} \quad (1)$$

де $i = 1\dots N$ – кількість точок в одному циклі при записі індикаторної діаграми; m – кількість записаних циклів; j – індекс циклу.

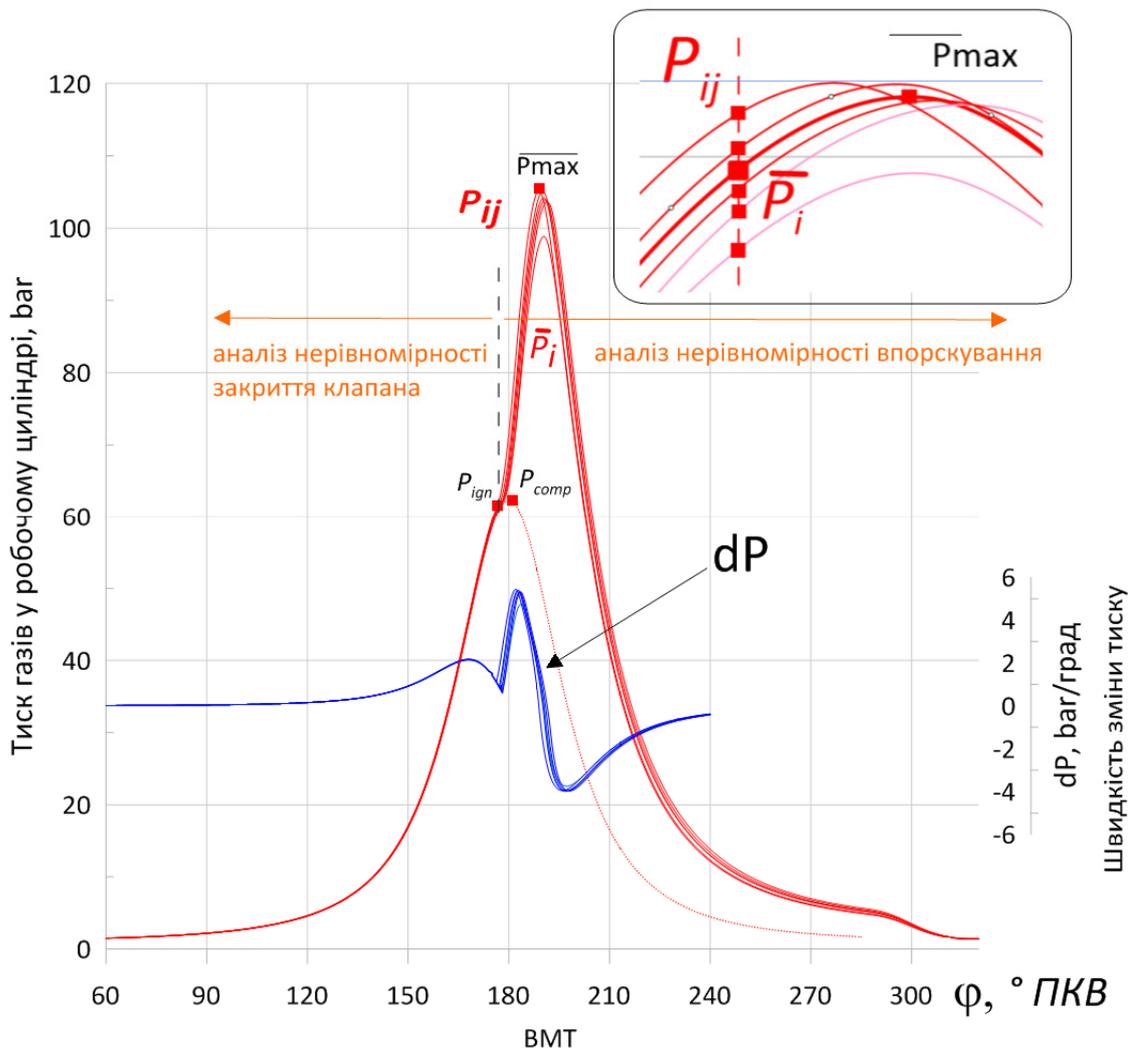


Рисунок 1 – Варіативність робочих процесів малообертового двигуна 6S60MC-C на ділянках згоряння діаграм тиску

Для оцінювання нерівномірності робочих циклів використовується показник COV (коефіцієнт варіації), який можна застосувати до всієї кривої тиску та отримати, таким чином, графік поточних значень COV_{P_i} як оцінку варіативності роботи двигуна. Запишемо коефіцієнт варіації робочих циклів, виражений у відсотках, як відношення стандартного відхилення до поточного середнього значення обраної величини, у даному випадку – тиску:

$$COV_{P_i} = \frac{\sigma_{P_i}}{P_i} \cdot 100\% \quad (2)$$

де $\bar{P}_i = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m P_{ij}$, а стандартне відхилення розраховується як:

$$\sigma_{P_i} = \sqrt{\frac{1}{m-1} \sum_{j=1}^m (P_{ij} - \bar{P}_i)^2} \quad (3)$$

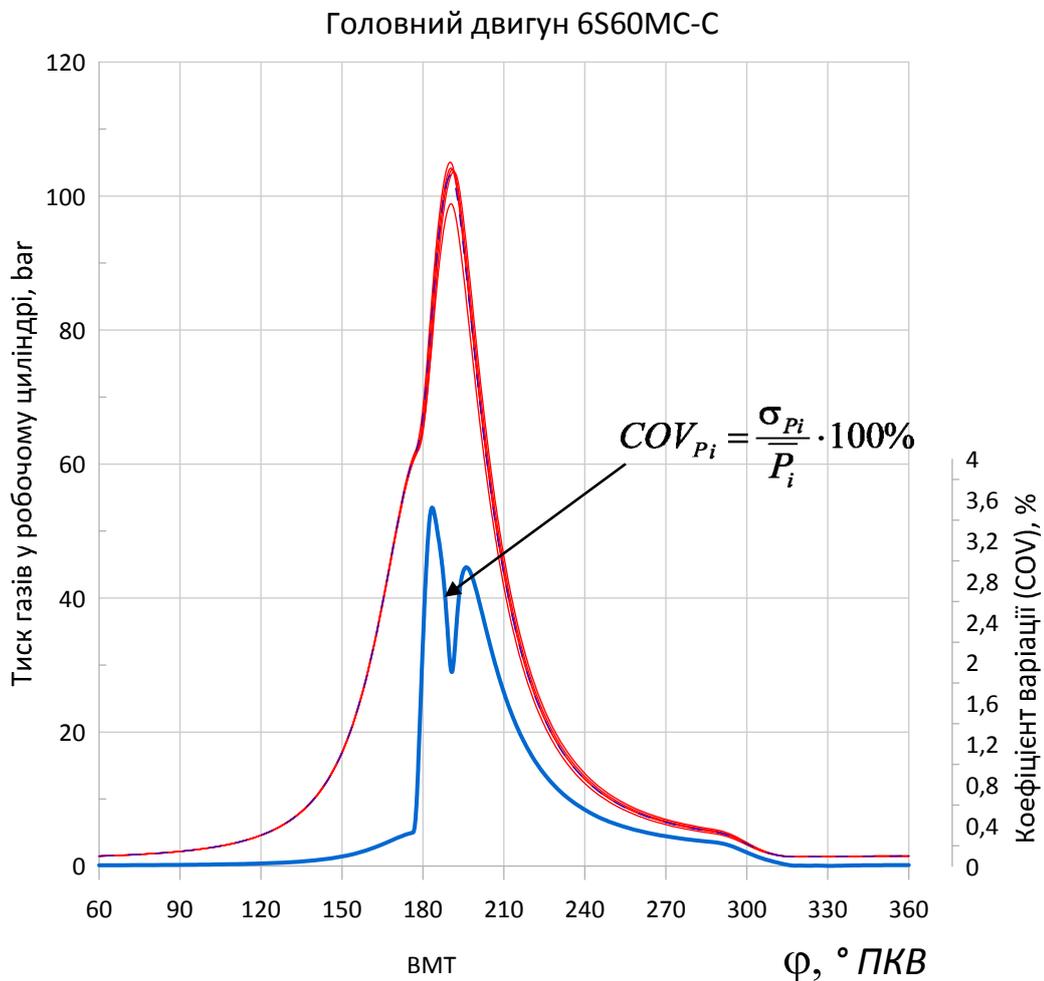


Рисунок 2 – Діаграма поточних значень COV_{P_i} малообертового двигуна 6S60MC-C на діаграмах тиску

У літературі пропонується розраховувати та проаналізувати максимальне значення $COV_{P_{\max}}$. Додатково до $COV_{P_{\max}}$ можна проаналізувати також поточне

(діаграма COV_{P_i}) та середнє значення $\overline{COV_{P_i}}$ (6). Діаграма поточних значень COV_{P_i} покаже, на якій ділянці кривої тиску спостерігається найбільше відхилення робочих циклів, і залежно від цього можна зробити висновок про нестабільність впорскування палива або нестабільну роботу клапанів газорозподілу (див. рис. 2). На основі розташування цих ділянок можна визначити джерело нестабільності – чи то система впорскування палива, чи нестабільна робота клапанів газорозподілу.

Розроблено **комплексний показник** оцінки нерегулярності робочих циклів (*cycle irregularity index, CI_p*), що забезпечує узагальнену характеристику циклової варіативності та враховує як максимальне, так і середнє значення коефіцієнта варіації. Цей показник забезпечує узагальнену характеристику циклової варіативності роботи двигуна:

$$CI_p = \sqrt{\overline{COV_{P_i}} \cdot COV_{P_{\max}}}, \% \quad (4)$$

$$COV_{P_{\max}} = \max(COV_{P_i}) \% ; \quad (5)$$

$$\overline{COV_{P_i}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N COV_{P_i} \% ; \quad (6)$$

Індекс нерегулярності циклу CI_p представляється у відсотковому вираженні. За результатами порівняльного аналізу теоретичних розрахунків та експериментальних досліджень (див. рис. 3), цей показник демонструє свою практичну цінність як ефективний інструмент для інтегральної оцінки міжциклової варіативності (*cycle-to-cycle variability*).

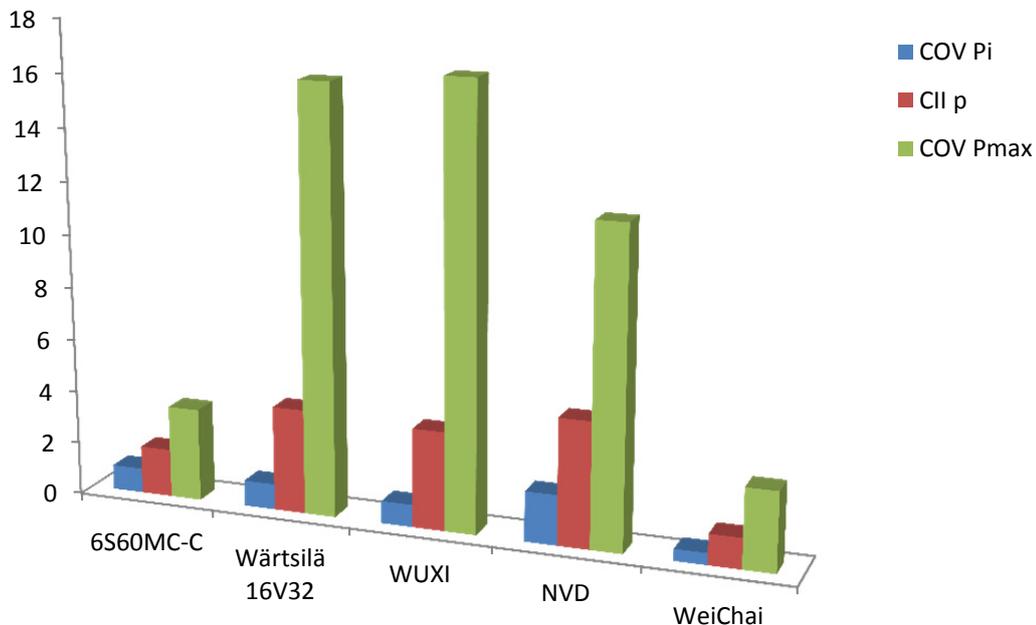


Рисунок 3 – Порівняння показників $COV_{P_{\max}}$, $\overline{COV_{P_i}}$ та CI_p (%) для п'яти типів двигунів

Порівняльний аналіз трьох діагностичних показників представлено на рис. 3 та в табл. 1. Дослідження охоплює різні типи двигунів: малообертового двотактного *MAN S60MC-C*; чотиритактного суднового головного двигуна *WUXI*; чотиритактного суднового дизель-генератора *Wartsila 16V32* і лабораторних чотиритактних двигунів в режимі *MCR* (максимальної тривалої потужності): *Deutz 226* (2021 року випуску) та *NVD24* (1970 року випуску).

Таблиця 1 – Порівняння показників COV та CII_p для п'яти типів двигунів

Показник	6S60MC-C	Wärtsilä 16V32	WUXI	NVD	WeiChai
$\overline{COV_{P_i}}$ %	0,943	0,980	0,852	1,906	0,451
CII_p %	1,822	3,977	3,759	4,778	1,168
$COV_{P_{max}}$ %	3,524	16,142	16,594	11,976	3,025

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.

Аналіз вібродіаграм на ділянках впорскування палива і ділянках закриття клапанів також може бути проведений чисельно. Зіставлення вібродіаграм на етапі стиснення дозволяє визначити ступінь варіативності функціонування клапанного механізму. Аналогічне порівняння на етапі згоряння забезпечує оцінку стабільності роботи компонентів паливної апаратури високого тиску.

Однчасна реєстрація сигналів тиску та вібрації з подальшим зіставленням робочих циклів дозволяє визначити середньоквадратичне відхилення фазових характеристик – кута випередження впорскування φ_{adv} та тривалості впорскування φ_{inj} , див. рис. 4.

На відміну від оцінки циклової варіативності тиску в циліндрі, де використовуються відносні критерії у відсотках, аналіз варіативності впорскування палива та роботи механізму газорозподілу потребує абсолютних значень. Такі відхилення вимірюються в кутових градусах повороту колінчастого вала ($^{\circ}$ ПКВ).

Використання абсолютних значень забезпечує чітку інтерпретацію відхилень фаз впорскування палива між циліндрами. Наприклад, розкид тривалості впорскування $\Delta\varphi_{inj} = 3...5$ $^{\circ}$ ПКВ свідчить про критичну нестабільність процесу, тоді як значення $\Delta\varphi_{inj} = 0...3$ $^{\circ}$ ПКВ вказує на його високу стабільність.

Для оцінки циклової варіативності кута випередження впорскування палива в циліндр можна використовувати середньоквадратичне відхилення фазового положення передніх фронтів перших імпульсів вібродіаграм впорскування:

$$\Delta\varphi_{adv, \text{ } ^{\circ} CA} \cong \sigma_{\varphi_{adv}} = \sqrt{\frac{1}{m-1} \sum_{j=1}^m (\varphi_{advj} - \overline{\varphi_{advj}})^2} \quad (7)$$

де m – деяка кількість вібродіаграм ($j = 1...m$), φ_{advj} – значення кута випередження впорскування в j -тому циклі, $\overline{\varphi_{advj}}$ – середнє значення кута випередження впорскування.

Аналогічно і для тривалості впорскування палива в циліндр. Циклова варіативність тривалості впорскування палива визначається через стандартне відхилення часових інтервалів між передніми фронтами імпульсів на вібродіаграмах процесу впорскування:

$$\Delta\varphi_{inj} = \sqrt{\frac{1}{m-1} \sum_{j=1}^m (\varphi_{inj_j} - \overline{\varphi_{inj_j}})^2} \quad (8)$$

де m – деяка кількість вібродіаграм ($j = 1 \dots m$), φ_{inj_j} – тривалість впорскування в j -тому циклі, $\overline{\varphi_{inj_j}}$ – середня тривалість впорскування.

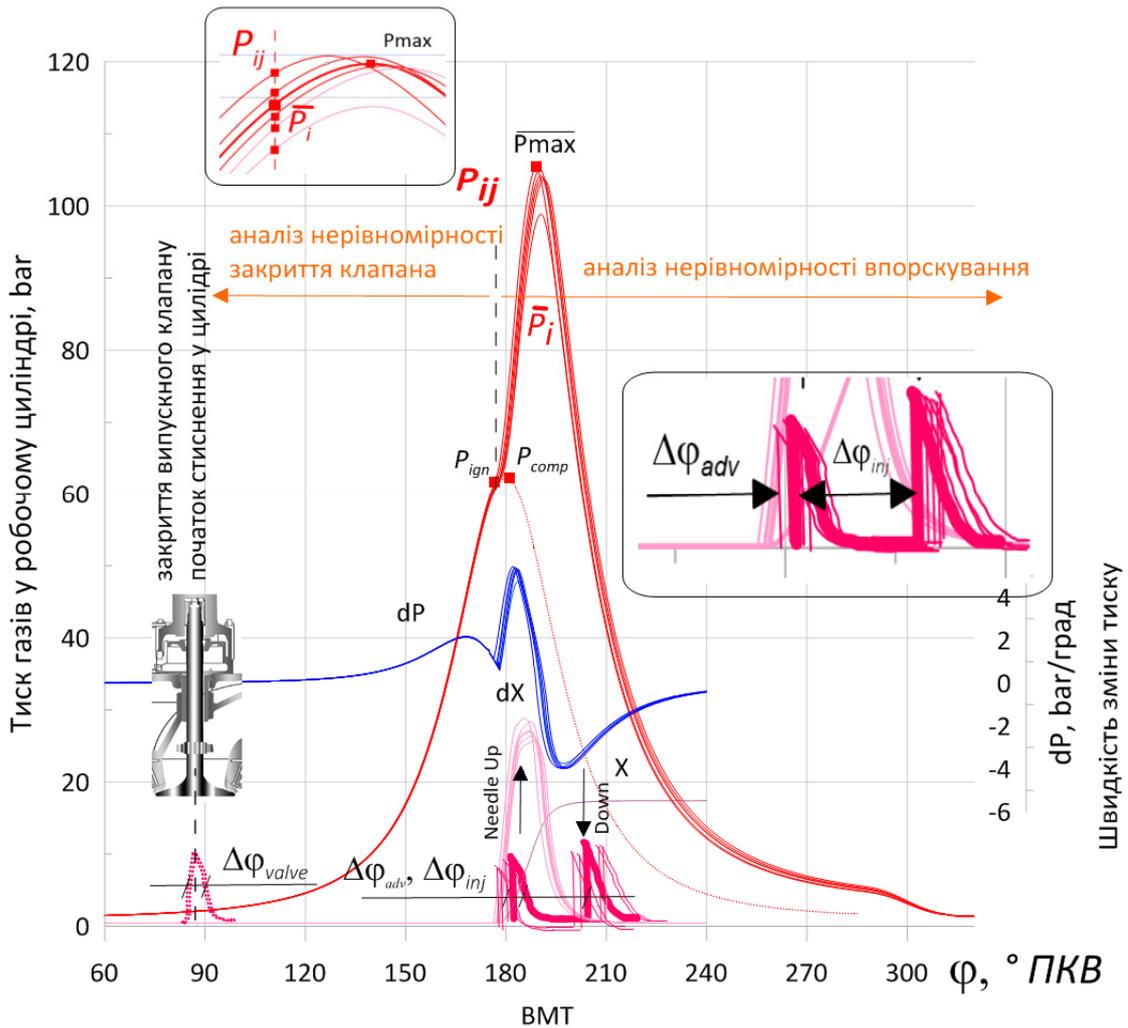


Рисунок 4 – Нестабільність робочих процесів малообертового двигуна 6S60MC-C, відображена на діаграмах тиску та вібродіаграмах форсунки і клапану

Для оцінки циклової варіативності кутів закриття клапанів використовується середньоквадратичне відхилення фаз максимумів віброімпульсів клапанів на вібродіаграмах впорскування:

$$\Delta\varphi_{valve}, ^\circ CA \cong \sigma_{\varphi_{valve}} = \sqrt{\frac{1}{m-1} \sum_{j=1}^m (\varphi_{valve_j} - \overline{\varphi_{valve_j}})^2} \quad (9)$$

де $\varphi_{valve j}$ – кут закриття клапана в j -тому циклі, $\overline{\varphi_{valve j}}$ – середнє значення кута закриття клапана. Всі кутові величини вимірюються в градусах повороту колінчастого вала ($^{\circ}$ ПКВ).

В процесі експлуатації різних моделей двигунів запропоновано використовувати систему граничних значень циклової варіативності з кольоровим маркуванням (зелений, жовтий, червоний діапазони). Приклад такої системи для двигуна 6S60MC-C наведено на рис. 5, де встановлено граничні значення варіативності кута випередження впорскування палива.

$\Delta\varphi_{adv}$	$< 0,5 \text{ }^{\circ}\text{CA}$ <i>Normal</i>	$0,6 \dots 2,5 \text{ }^{\circ}\text{CA}$ <i>Warning</i>	$> 2,6 \text{ }^{\circ}\text{CA}$ <i>Alarm</i>
-----------------------	--	---	---

Рисунок 5 – Візуальний контроль критерію циклової варіативності кута випередження впорскування палива для двигуна 6S60MC-C

Візуальний контроль критеріїв циклової варіативності (*cycle-to-cycle variability*) буде зручним в експлуатації, і він може здійснюватися в реальному часі за допомогою аналізу часових діаграм до вирішення задачі синхронізації даних.

Проведені експериментальні дослідження на різних типах суднових дизелів системою *DEPAS 5.0W* підтвердили ефективність розроблених методів діагностування, особливо для режиму реального часу та їх практичну цінність для підвищення надійності експлуатації суднових енергетичних установок.

Теоретично обґрунтовано комплексний підхід до діагностики робочого процесу транспортних дизелів у режимі реального часу, що передбачає паралельний аналіз індикаторних діаграм та вібродіаграм. Доведено, що використання датчика тиску газів у робочому циліндрі спільно з датчиком вібрації суттєво розширює діагностичні можливості системи моніторингу, дозволяючи аналізувати не лише параметри робочого процесу, але й фази подачі палива та газорозподілу.

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 транспортних дизелів. На підставі аналізу наукових праць вітчизняних і закордонних авторів Фоміна Ю. Я., Семенова В. С., Івановського В. Г., Варбанця Р. А., Мінчева Д. С., *Stefan Neumann, Zbigniew Korczewski, Jacek Rudnicki, Stanisław Polanowski, Per Tunestal, Emiliano Pipitone, Alberto Beccari, Klaas Visser, Douwe Stapersma* та інших авторів проведено аналіз існуючих методів визначення ВМТ та виявлено їхні основні обмеження, зокрема значну чутливість до шумів при аналізі похідних сигналу тиску, отриманих чисельними методами. Встановлено, що точність визначення ВМТ критично впливає на розрахунок основних параметрів робочого процесу дизеля, а похибка в 1° повороту колінчастого вала (ПКВ) може призвести до помилки в розрахунок середнього індикаторного тиску (*MIP*) до 9 % та похибки до 25 % у розрахунок

характеристики тепловиділення.

Розроблено новий аналітичний метод визначення ВМТ поршня, що базується на аналізі ділянки кривої стиснення в циліндрі та не використовує похідні від кривої тиску, які містять високий рівень шуму в експериментальних даних. На відміну від існуючих підходів, запропонований метод ефективно працює за відсутності інформації про фактичний ступінь стиснення в циліндрі та тиск наддувного повітря, що особливо важливо для сучасних двигунів зі змінними фазами газорозподілу.

Удосконалено алгоритм попередньої синхронізації, який визначає початкове положення ВМТ шляхом аналізу діаграм швидкості зміни тиску. Розроблено емпіричну формулу, що пов'язує положення ВМТ з екстремумами першої похідної кривої тиску, враховуючи характер згоряння палива (м'яке або жорстке). Показано, що алгоритм забезпечує достатню для більшості практичних випадків точність і може використовуватись як перше наближення для основного методу.

Аналітичний метод визначення ВМТ поршня.

Визначити положення ВМТ, а потім розв'язати задачу синхронізації даних, тобто переведення даних тиску в циліндрі з функції часу в функцію за кутом повороту колінчастого валу $P(t, ms) \rightarrow P(deg, °CA)$, пропонується за допомогою аналізу записаної кривої тиску, для якої справедливе рівняння:

$$PV^n = const \quad (10)$$

де P, V – тиск і об'єм у робочому циліндрі; $n = 1,33 \dots 1,37$.

Запропонований метод базується на законі політропного стиснення в циліндрі за умови постійного середнього значення коефіцієнта політропи стиснення n . Окрім відсутності інформації про фактичний ступінь стиснення $\varepsilon = V_a/V_c$, часто буває невідомим або дуже приблизно відомим тиск наддувного повітря P_{scav} . Тиск наддуву має малу абсолютну величину, тому на практиці він вимірюється, як правило, з великою похибкою. Неточне внесення P_{scav} може суттєво спотворити результати розрахунку і внести похибку в розрахункові значення середнього індикаторного тиску MIP та індикаторної потужності циліндра N_i . Отож актуальним є завдання визначення з заданою точністю ВМТ та подальша синхронізація даних при невідомих параметрах ступеня стиснення ε та тиску наддувного повітря P_{scav} . Розв'яжемо це завдання для ділянки $[P_1 \dots P_2]$ на кривій стиснення, див. рис. 6.

Запишемо вираз, справедливий для будь-яких двох точок на кривій стиснення:

$$P_1 V_1^n = P_2 V_2^n = const \quad (11)$$

Для того, щоб виключити вплив шумів на кривій тиску, значення P_1 і P_2 визначаються як значення квадратних поліномів, що апроксимують відповідні обведені ділянки біля точок P_1 і P_2 , див. рис. 6.

Основний аналітичний метод визначення ВМТ свідомо уникає використання похідних від кривої тиску через їх високу чутливість до шумів вимірювання. Однак діаграми швидкості зміни тиску dP/dt , представлені на рисунках 6, 7, 8 виконують важливу діагностичну функцію у загальній системі аналізу робочого процесу двигуна. Аналіз швидкості зміни тиску дозволяє ідентифікувати момент початку згоряння палива, який проявляється як різка зміна характеру кривої dP/dt . Під час стиснення швидкість зростання тиску залишається відносно стабільною, але з початком активного тепловиділення від згоряння палива вона різко збільшується.

Цей перехід чітко фіксується на діаграмі похідної і служить надійним індикатором фази початку згоряння.

Крім того, співвідношення максимальних значень $P'_{\max 1}$ і $P'_{\max 2}$ при стисненні та згорянні характеризує жорсткість робочого процесу двигуна. «М'яке» згоряння супроводжується плавним наростанням тиску, тоді як «жорстке» згоряння дає різкі піки на діаграмі швидкості зміни тиску. Ця інформація використовується для класифікації типу згоряння і вибору відповідних коефіцієнтів при визначенні початкового наближення ВМТ.

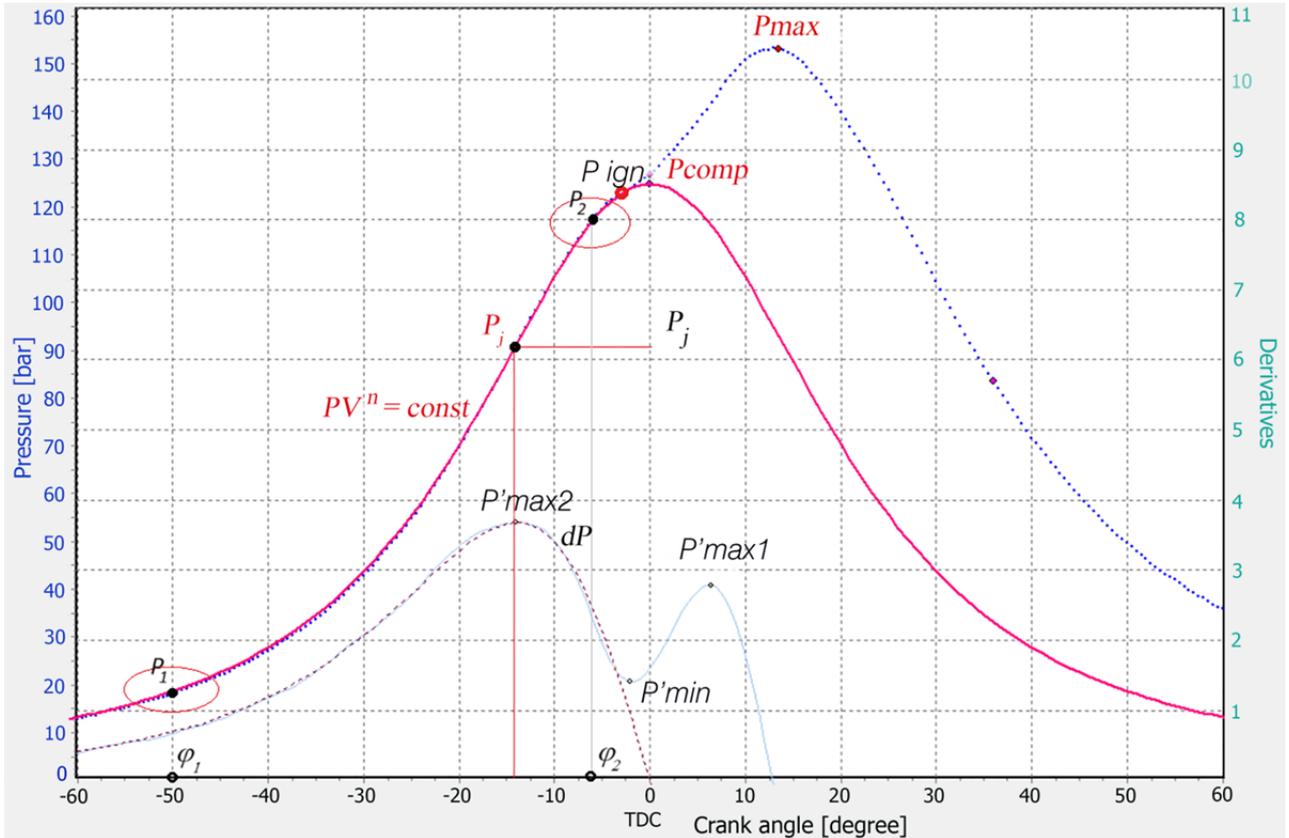


Рисунок 6 – Робочий процес чотиритактного середньообертового дизеля *YANMAR 6EY18ALW* із займанням палива до ВМТ

Таким чином, похідні застосовуються не для прямого розрахунку положення ВМТ, а для інтерпретації фізичних процесів у циліндрі та налаштування параметрів основного аналітичного алгоритму. Попередня цифрова фільтрація сигналу dP/dt забезпечує достатню точність для цих допоміжних діагностичних задач.

$$P_1 = a_1\varphi_1^2 + b_1\varphi_1 + c_1 \quad (12)$$

$$P_2 = a_2\varphi_2^2 + b_2\varphi_2 + c_2 \quad (13)$$

де коефіцієнти a_1, b_1, c_1 і a_2, b_2, c_2 поліномів, що апроксимують криву тиску, визначаються за допомогою методу найменших квадратів на ділянках $\varphi_1(\varphi_2) \pm 5 \dots 10$ °ПКВ залежно від зашумленості даних (див. обведені ділянки рис. 6).

З урахуванням виразів для об'ємів циліндра при фазах повороту колінчастого вала φ_1 і φ_2 , рівняння (11) можна записати як:

$$P_1(V_{S1} + V_C)^n = P_2(V_{S2} + V_C)^n \quad (14)$$

$$\frac{V_{S1} + V_C}{V_{S2} + V_C} = \sqrt[n]{\frac{P_2}{P_1}} \quad (15)$$

де V_C – об'єм камери стиснення; $V_{S1} + V_C = V(\varphi_1)$, $V_{S2} + V_C = V(\varphi_2)$, а вираз для поточного об'єму циліндра $V(\varphi)$ запишемо у вигляді:

$$V(\varphi) = V_C + \frac{\pi D^2}{4} s(\varphi) \quad (16)$$

де D – діаметр циліндра.

$$s(\varphi) = R \left[\sqrt{\left(1 - \frac{1}{\lambda_{CR}}\right)^2 - k_p^2} - \frac{1}{\lambda_{CR}} \sqrt{1 - \lambda_{CR}^2 (\sin(\varphi) - k_p)^2} - \cos(\varphi) \right] \quad (17)$$

де R – радіуса кривошипа, $\lambda_{CR} = R/L$ – відношення радіуса кривошипа до довжини шатуна, $k_p = e/R$ – відносний ексцентриситет, e – ексцентриситет кривошипа.

Позначимо в (16) вираз під коренем $\sqrt[n]{\frac{P_2}{P_1}} = A$, і остаточно вираз для об'єму камери стиснення V_C у вигляді:

$$AV_C - V_C = V_{S1} - AV_{S2}; \quad (18)$$

$$V_C = \frac{V_{S1} - AV_{S2}}{A - 1} \quad (19)$$

Таким чином, отримані в результаті індиціювання двигуна значення тисків у двох точках P_1, P_2 на кривій стиснення і приблизні початкові фази φ_1 і φ_2 відносно невідомої ВМТ дають можливість визначити об'єм камери стиснення $V_C = f(V_{S1}, V_{S2}, A)$ методом ітерацій, який буде необхідний для подальшого моделювання кривої стиснення в циліндрі:

$$P_1 V_1^n = P_j V_j^n; \quad (20)$$

$$P_j = P_1 \left(\frac{V_{S1} + V_C}{V_{Sj} + V_C} \right)^n \quad (21)$$

У зв'язку з температурною зміною постійного рівня неохолоджуваних датчиків тиску, які застосовуються в сучасних системах діагностування морських дизелів, цей постійний рівень віднімають при вимірюваннях, виключаючи таким чином навіть приблизну оцінку тиску на початку стиснення P_a . Тоді тиски на кривій стиснення P_1 і P_2 з урахуванням невідомого тиску на початку стиснення запишемо:

$$P_1 = \overline{P}_1 + P_a; \quad (22)$$

$$P_2 = \overline{P}_2 + P_a, \quad (23)$$

де $\overline{P}_1, \overline{P}_2$ – значення тиску з відрахуванням постійним температурним рівнем.

Як початкове наближення P_a (див. рис. 6) можна прийняти:

$$P_a = P_{ign} / \varepsilon_{pass}, \quad (24)$$

де ε_{pass} – паспортне або наближене значення ступеня стиснення в циліндрі.

За початкове наближення положення ВМТ можна умовно взяти фазу максимального тиску згоряння P_{max} . У такому випадку, значення змінної φ включатиме шукану поправку для розрахункового положення ВМТ поршня:

$$\varphi = \varphi + \Delta\varphi_{TDC} \quad (25)$$

де $\Delta\varphi_{TDC}$ – початкове наближення положення ВМТ.

Початкове наближення положення ВМТ $\Delta\varphi_{TDC}$ визначається за допомогою алгоритму, описаного нижче.

Для побудови моделі кривої стиснення (21), розробленої на основі рівняння політропи стиснення (10), використовуються дані тиску в робочому циліндрі. Ці дані отримані при індиціюванні двигуна з вирахуванням температурним постійним рівнем \bar{P}_j та з початковими приблизними оцінками P_a і $\Delta\varphi_{TDC}$.

Отже, модель кривої стиснення P_j є функцією двох невідомих параметрів: P_a і $\Delta\varphi_{TDC}$:

$$P_j = f(P_a, \Delta\varphi_{TDC}). \quad (26)$$

Моделювання здійснюється методом найменших квадратів за допомогою методу безградієнтної нелінійної n -параметричної мінімізації *Powell-64*. Мінімізований функціонал запишемо у вигляді:

$$F = \sum_{j=\varphi_1}^{\varphi_2} [\bar{P}_j - P_j(P_a, \Delta\varphi_{TDC})]^2 \rightarrow \min \quad (27)$$

де φ_1, φ_2 – межі моделювання ділянки кривої стиснення.

Метод дозволяє визначити мінімум нелінійної функції n -змінних шляхом проведення послідовних пошуків вздовж системи сполучених напрямків. Метод *Powell*'64 не використовує похідних для здійснення пошуку, що зручно в практичних розрахунках. Метод є ефективним не тільки для квадратичних функцій, але й для нелінійних n -параметричних функцій загального вигляду.

В результаті мінімізації функціоналу отримаємо модель ділянки стиснення $[P_1 \dots P_2]$ (див. рис. 6), побудовану на базі даних індиціювання двигуна, і головне – отримаємо із заданою точністю значення P_a і $\Delta\varphi_{TDC}$, що дає можливість уточнити положення ВМТ і розв'язати задачу синхронізації даних без використання ступеня стиснення в циліндрі. Остаточний аналіз даних індиціювання, після розв'язання задачі аналітичної синхронізації даних, дає можливість визначити середній індикаторний тиск MIP , індикаторну потужність циліндра N_i та основні параметри робочого процесу.

Визначення початкового наближення ВМТ шляхом аналізу діаграм dP/dt .

Швидко визначення початкового значення ВМТ, яке розраховується за часовими діаграмами $P(t, ms)$, необхідне для роботи системи діагностики морських дизельних двигунів у режимі реального часу. Для цього, пропонується емпірична формула для визначення ВМТ, що базується на аналізі діаграм dP/dt , отриманих чисельним методом та оброблених цифровим фільтром, рис. 7, 8.

За початкове положення ВМТ умовно береться точка максимального тиску P_{max} . Після цього обчислюється відхилення до початкового наближення, а потім ВМТ коригується методом, детально описаним раніше.

Вивчення даних, отриманих під час індиціювання морських двигунів за допомогою датчиків *IMES*, та аналіз результатів моделювання робочих процесів у програмному середовищі *Blitz-PRO* дозволили виявити важливу закономірність. Встановлено, що початкове наближення ВМТ можна визначити, аналізуючи співвідношення між амплітудами та відповідними фазами екстремумів на кривій швидкості зміни тиску в робочому циліндрі.

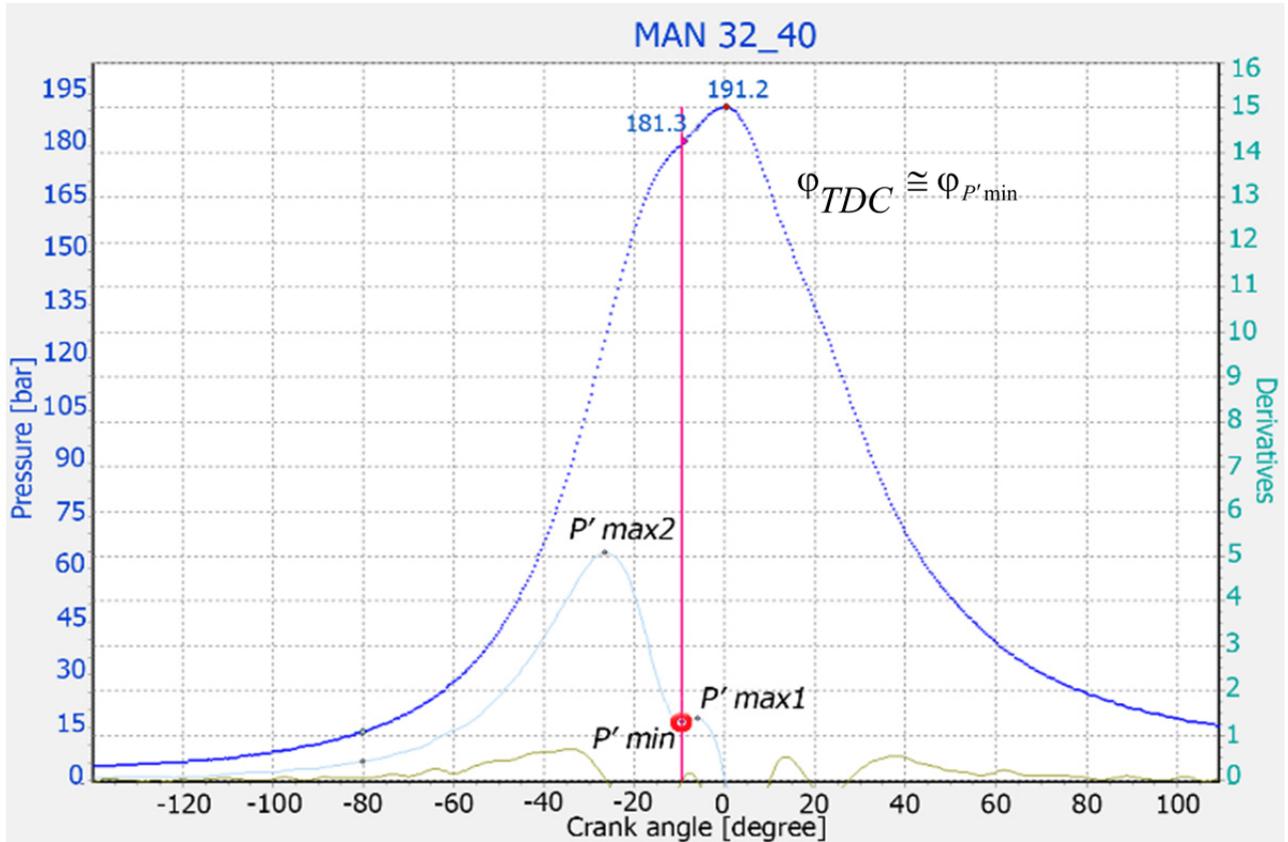


Рисунок 7 – Визначення початкового наближення ВМТ для двигуна *MAN 32/40* у випадку «м'якого» згоряння

Аналіз даних індиціювання морських двигунів різних типів показав, що залежно від характеру робочого процесу та типу індикаторної діаграми положення ВМТ у більшості випадків знаходиться між фазами $[\varphi_{P'_{min}} \dots \varphi_{P'_{max1}}]$ мінімуму першої похідної та максимуму першої похідної на ділянці згоряння.

Експериментально отримано співвідношення фаз максимумів перших похідних на ділянках згоряння $\varphi_{P'_{max1}}$, стиснення $\varphi_{P'_{max2}}$ та положення ВМТ φ_{TDC} , рис. 7, 8.

Для різних типів морських двигунів визначено, що у випадку «м'якого» згоряння, коли швидкість зміни тиску на ділянці згоряння менша, ніж на ділянці стиснення, положення ВМТ ближче до фази мінімуму першої похідної $\varphi_{P'_{min}}$, яка знаходиться між стисненням і згорянням, див. рис. 7.

Для двигунів з «жорстким» згорянням, коли максимум першої похідної на ділянці згоряння більший, ніж на ділянці стиснення, положення ВМТ знаходиться ближче до фази максимуму похідної на ділянці згоряння $\varphi_{P'_{max1}}$, рис. 8.

При цьому виділяються два крайні випадки залежно від відношення величин $P'_{\max 1}/P'_{\max 2}$ (варто зазначити, що ці співвідношення базуються на емпіричних даних і потребують корегування для кожного конкретного типу двигуна):

$$\frac{P'_{\max 1}}{P'_{\max 2}} < 0,5 \rightarrow \varphi_{TDC} \cong \varphi_{P' \min}; \quad (28)$$

$$\frac{P'_{\max 1}}{P'_{\max 2}} > 3 \rightarrow \varphi_{TDC} \cong \varphi_{P' \max 1}; \quad (29)$$

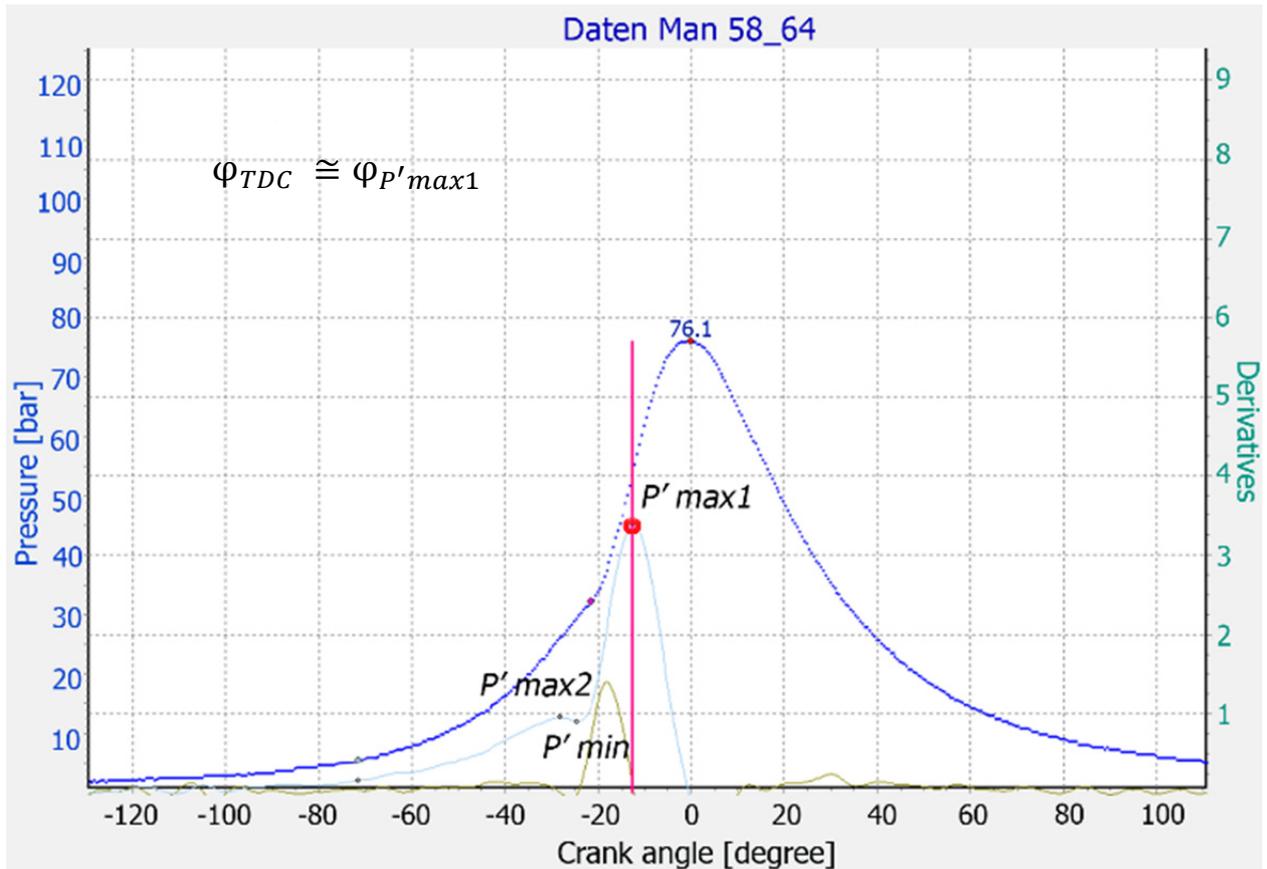


Рисунок 8 – Визначення початкового наближення ВМТ для двигуна MAN 58/64 з «жорстким» згорянням

Для сучасних двигунів $P'_{\max 1}/P'_{\max 2}$ – відношення швидкостей зміни тиску при згорянні та стисненні може бути меншим за 1,0, тобто швидкість підвищення тиску при згорянні менша, ніж при стисненні, що характеризує «м'яке» згоряння без значних динамічних навантажень на кривошипно-шатунний механізм та підшипники, див. рис. 7. У цьому випадку положення ВМТ ближче до фази мінімуму першої похідної $\varphi_{TDC} \cong \varphi_{P' \min}$.

В загальному випадку, залежність між положенням ВМТ та екстремумами першої похідної можна представити такою емпіричною формулою:

$$\Delta\varphi_{TDC} = \varphi_{P' \min} + \frac{\varphi_{P' \max 1} - \varphi_{P' \min}}{\theta_1 - \theta_2} \cdot \left(\frac{P'_{\max 1}}{P'_{\max 2}} - \theta_2 \right), \quad (30)$$

де $\theta_1 = [3...5]$, $\theta_2 = [0,3...0,9]$ – емпіричні коефіцієнти; $\varphi_{P'_{\min}}$ – фаза мінімуму швидкості зміни тиску між фазами максимумів на стисненні та на згорянні; $\varphi_{P'_{\max 1}}$ – фаза максимуму швидкості зміни тиску при згорянні палива; $P'_{\max 1}$ і $P'_{\max 2}$ – максимальні швидкості зміни тиску стиснення та згоряння.

Початкове визначення ВМТ у більшості випадків має відносно невисоку абсолютну похибку і може бути застосоване для роботи системи діагностики в режимі реального часу. Перевагою розрахунку початкового наближеного значення ВМТ є висока швидкість обчислень, враховуючи необхідність попереднього визначення екстремумів першої похідної від кривої тиску. Також перевагою алгоритму є невисока чутливість до шумів першої похідної від експериментальних даних тиску.

Недоліком алгоритму є необхідність підбору коефіцієнтів θ_1 , θ_2 . Проте, одноразово підібрані коефіцієнти можуть потім бути використані для основних експлуатаційних режимів двигуна, що дає можливість аналізувати діаграму тиску в циліндрі в реальному часі.

У **четвертому розділі** для моделювання типових несправностей двигуна та підтвердження ефективності розроблених діагностичних методів використано спеціалізований розрахунковий онлайн-сервіс *Blitz-PRO*.

Обраний для аналізу онлайн-сервіс *Blitz-PRO* дає можливість моделювати процеси роботи двигунів внутрішнього згоряння. Сервіс має вільний доступ; можливе моделювання як стаціонарного, так і нестійких режимів роботи двигуна.

Математична модель заснована на квазістаціонарній та одновимірній нестаціонарній системах рівнянь, що описують процеси у відкритих термодинамічних системах, що входять до загальної термодинамічної системи – двигуна.

Системи квазістаціонарних рівнянь включають перший закон термодинаміки, диференціальні рівняння балансу мас та газового стану. Вони можуть бути виражені для однозонних та двозонних відкритих термодинамічних систем. Перший закон термодинаміки може бути виражений як:

$$\left(\frac{dI_{fuel}}{d\varphi} + \sum_1^{n_1} \frac{dI_j}{d\varphi} \right) + \frac{\delta Q_{comb}}{d\varphi} + \sum_1^{n_2} \frac{\delta Q_{wall,i}}{d\varphi} = c_{vm} T \left(\sum_1^{n_1} \frac{dm_j}{d\varphi} + \frac{dm_{fuel}}{d\varphi} \right) + c_v m \frac{dT}{d\varphi} + m T \frac{d(c_v)_T}{d\varphi} + P \frac{dV}{d\varphi} \quad (31)$$

де $dI_{fuel}/d\varphi$, $dI_j/d\varphi$ – швидкість зміни ентальпії за рахунок випаровування палива і процесу масообміну, $\delta Q_{comb}/d\varphi$ – швидкість виділення тепла внаслідок згоряння палива, $\delta Q_{wall,i}/d\varphi$ – швидкість теплопередачі до стінок системи, $dm_{fuel}/d\varphi$, $dm_j/d\varphi$ – масова витрата палива та масова витрата газів, n_1 – кількість взаємодіючих термодинамічних систем, що беруть участь у процесі масообміну, n_2 – кількість стінок, які беруть участь у процесі теплообміну, P , T , V , m – тиск, температура, об'єм, маса газової суміші, c_v , c_{vm} – фактична та середня ізохорна питома теплоємність.

Рівняння масового балансу та стану газу доповнюють рівняння першого закону термодинаміки:

$$dm = \sum_1^{n_1} dm_j + dm_{fuel}; PV = Z \frac{m}{\mu} RT, \quad (32)$$

де Z – коефіцієнт стиснення, розрахований за рівнянням Берто:

$$Z = 1 + \frac{9}{128} \frac{\pi}{\theta} \left(1 - \frac{6}{\theta^2} \right) \quad (33)$$

де $\pi = P/P_{crit}$, $\theta = T/T_{crit}$ відносно критичного тиску і температури.

Для налаштування математичної моделі використовувались інструкції виробника. Скориговану математичну модель, див. рис. 9, можна в подальшому використовувати для отримання додаткової діагностичної інформації з експериментальних даних, а також застосовувати для аналізу впливу різноманітних можливих несправностей на експлуатаційні характеристики двигуна.

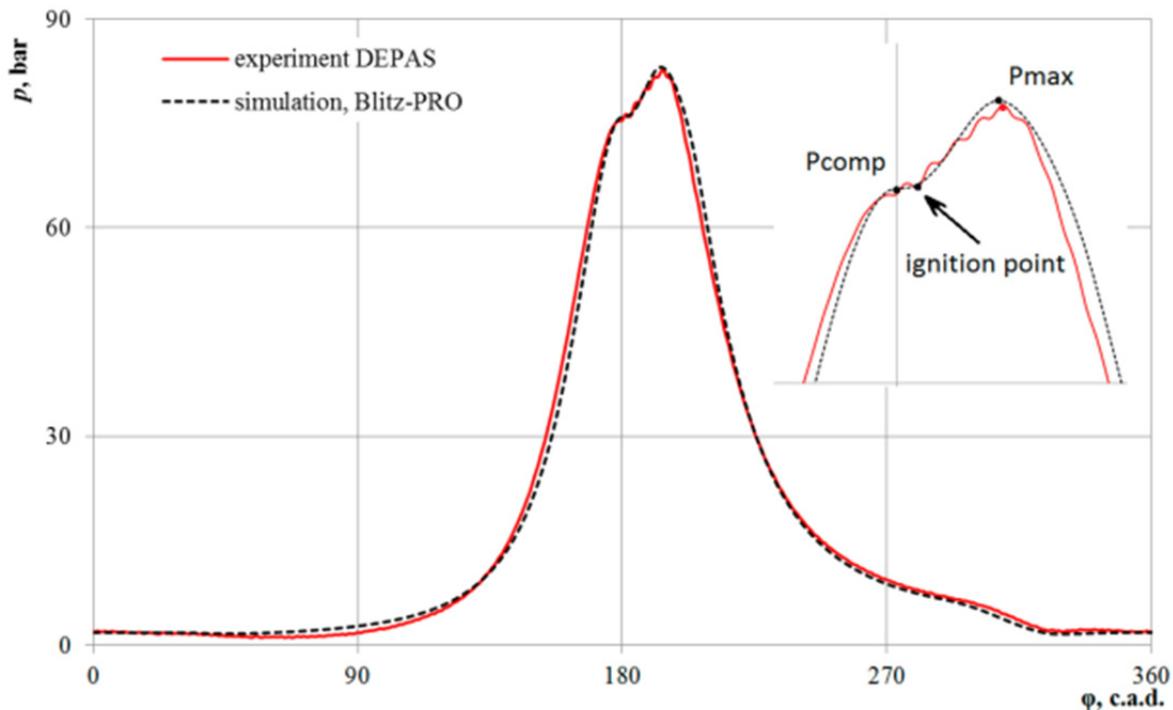


Рисунок 9 – Математично змодельована діаграма робочого циклу двигуна в онлайн-сервісі *Blitz-PRO* порівняно з експериментальною діаграмою

Обґрунтування діапазонів значень критеріїв циклової варіативності базується на вимогах морських класифікаційних товариств. Регламентовані значення допустимих відхилень основних параметрів робочого процесу, встановлені міжнародними морськими реєстрами, становлять нормативну основу для розробки критеріїв оцінки технічного стану двигуна. Згідно з вимогами класифікаційних товариств, допустиме відхилення та межі коливання подано в табл. 2.

Ці нормативи відображають досвід експлуатації морських дизельних двигунів та встановлюють межі, в яких двигун може працювати без ризику для його надійності та довговічності.

Таблиця 2 – Нормативні значення допустимих відхилень параметрів двигуна

Параметри робочого процесу	Допустимі відхилення
Індикаторна потужність циліндра N_i та середній індикаторний тиск MIP	не більше $\pm 2,5 \%$
Максимальний тиск згоряння P_{max}	не більше $\pm 3,5 \%$
Тиск кінця стиснення P_{comp}	не більше $\pm 2,5 \%$
Температура відпрацьованих газів T_{exh}	не більше $\pm 5 \%$

Чисельне моделювання та визначення допустимих діапазонів критеріїв варіативності. Для практичного застосування нормативних вимог морських класифікаційних товариств до конкретного типу двигуна було проведено комплексне чисельне моделювання робочого процесу з використанням спеціалізованого розрахункового онлайн-сервісу *Blitz-PRO*. Цей програмний інструмент забезпечує високоточне моделювання термодинамічних процесів у циліндрах дизельних двигунів.

Математична модель двигуна *MAN 7S50MC* була детально налаштована з урахуванням конструктивних особливостей 2-тактного малообертового дизеля: діаметр циліндра $D_{cyl} = 500$ мм, хід поршня $S_{pist} = 1910$ мм, номінальна потужність 10 010 кВт при 127 об/хв. Моделювання проводилось в режимі *MCR (Maximum Continuous Rating)* – максимальної тривалої потужності, що відповідає 100 % номінальної потужності двигуна. Цей режим обрано як критичний для оцінки граничних експлуатаційних характеристик та встановлення діагностичних критеріїв в умовах максимальних теплових і механічних навантажень, коли найбільш виражені ефекти циклової варіативності.

На рис. 10 представлено результати моделювання робочого процесу головного двигуна *MAN 7S50MC* при зміні кута випередження подачі палива $\Delta\varphi_{start.inj}$ в широкому діапазоні $-3,5...6,5^\circ$ ПКВ з кроком $\pm 2,5^\circ$ ПКВ відносно номінального значення ($\Delta\varphi_{start.inj} = 1,5^\circ$ ПКВ). Такий діапазон варіацій охоплює як типові експлуатаційні відхилення ($\pm 1...2^\circ$ ПКВ), так і критичні розрегулювання паливної апаратури, що можуть виникати при значному зносі або несправностях системи впорскування.

Результати демонструють виражену нелінійну залежність між відхиленням кута подачі палива та параметрами циклової нестабільності. При максимальних відхиленнях спостерігається критичне зростання значення коефіцієнта варіації тиску $COV_{P_{max}}$ до 13,48 % на ділянці згоряння (фаза $190...210^\circ$ ПКВ) після ВМТ, що проявляється у пропорційному збільшенні індексу нерегулярності циклу до значення $CI_p = 4,53 \%$.

Фізичний механізм такого впливу полягає в порушенні оптимальної синхронізації процесів сумішоутворення та тепловиділення. Передчасна подача палива ($+3,5...+6,5^\circ$ ПКВ) призводить до жорсткого згоряння з різким наростанням

тиску, підвищеними механічними навантаженнями на кривошипно-шатунний механізм та нерівномірністю крутного моменту. Запізнена подача ($-1,5 \dots -3,5^\circ$ ПКВ) викликає неповне згоряння палива через недостатній час для завершення хімічних реакцій, що призводить до критичного зростання температури випускних газів понад допустимі межі та зниження економічності двигуна, див. рис. 10.

Головний двигун MAN B&W 7S50MC

Зміна кута випередження подачі палива $\Delta\varphi_{start.inj} \pm 2,5^\circ$ ПКВ

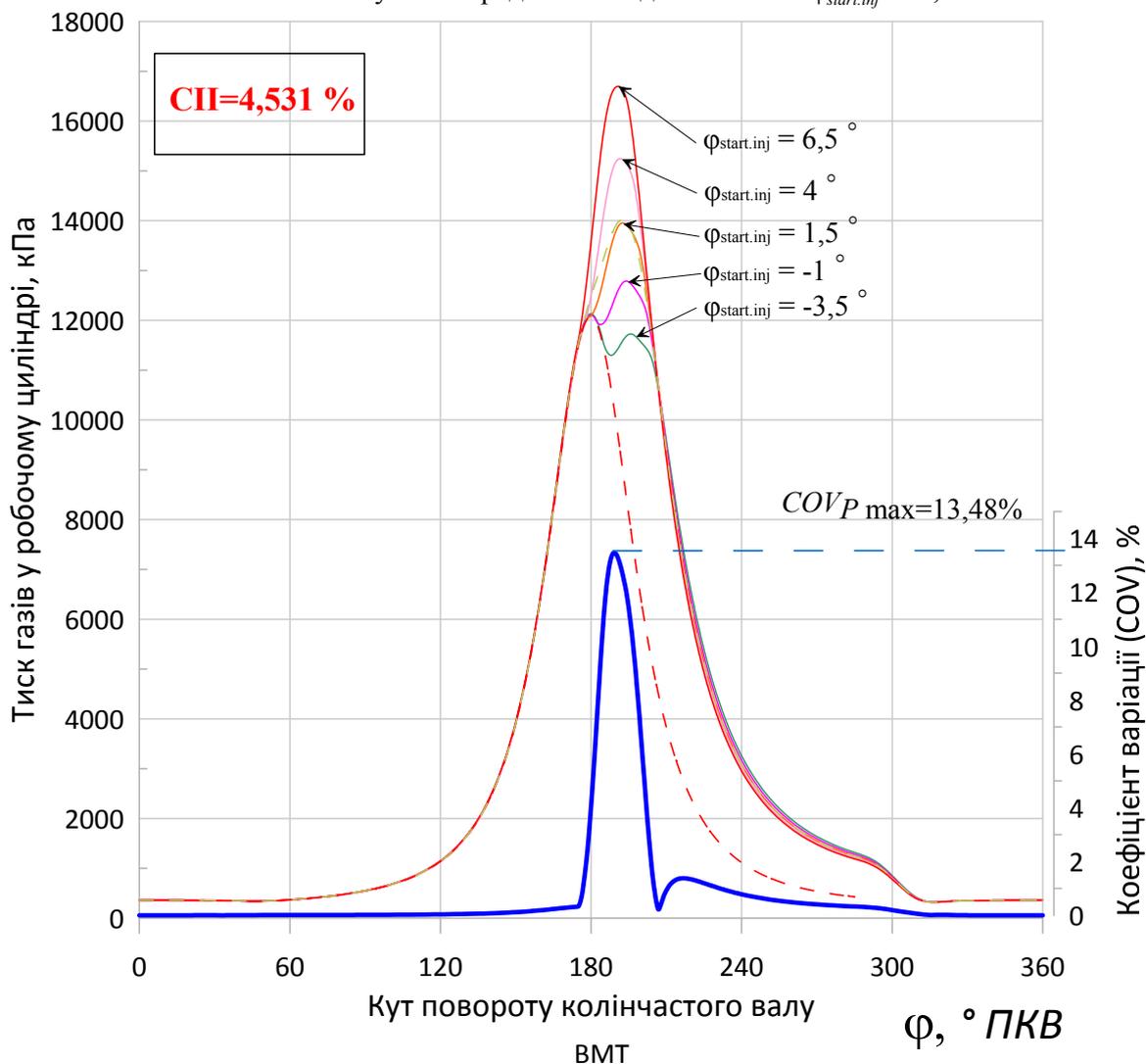


Рисунок 10 – Моделювання робочого процесу ГД MAN 7S50MC при зміні кута випередження подачі палива $\Delta\varphi_{start.inj}$ в онлайн-сервісі *Blitz-PRO*

На рис. 11 представлено узагальнені результати зміни індикаторної потужності N_i та середнього індикаторного тиску MIP для досліджуваного двигуна при зміні кута випередження подачі палива. Аналіз отриманих залежностей дозволив встановити чіткі кількісні межі між рівнями технічного стану двигуна:

– зміна індикаторної потужності N_i та середнього індикаторного тиску MIP до 2% (зелений сектор, нормальний стан) відповідає значенням індексу нерегулярності циклу $CI_p < 1,9\%$ та варіативності кута випередження впорскування палива $\Delta\varphi_{adv} < 2,0^\circ$ ПКВ. Цей діапазон характеризує штатну роботу

двигуна з мінімальними відхиленнями, що забезпечує оптимальну паливну економічність та довговічність основних вузлів.

- зміна індикаторної потужності N_i та MIP в межах 2...3 % (жовтий сектор, потребує підвищеної уваги) відповідає індексу нерегулярності циклу $CI_p = 1,9...4,5$ % та варіативності кута випередження впорскування палива $\Delta\varphi_{adv} = 2,0...3,5^\circ$ ПКВ. Такі параметри сигналізують про початкову деградацію системи паливободачі, що потребує планового технічного обслуговування для запобігання подальшому погіршенню стану.

- зміна індикаторної потужності N_i та MIP більше 3 % (червоний сектор, незадовільний стан) відповідає критичним значенням $CI_p > 4,5$ % та варіативності кута випередження $\Delta\varphi_{adv} > 3,5^\circ$ ПКВ. Такі відхилення вказують на серйозні порушення в роботі паливної апаратури, що вимагають негайного технічного втручання для запобігання аварійним ситуаціям.

Головний двигун MAN B&W 7S50MC при номінальній потужності (MCR)

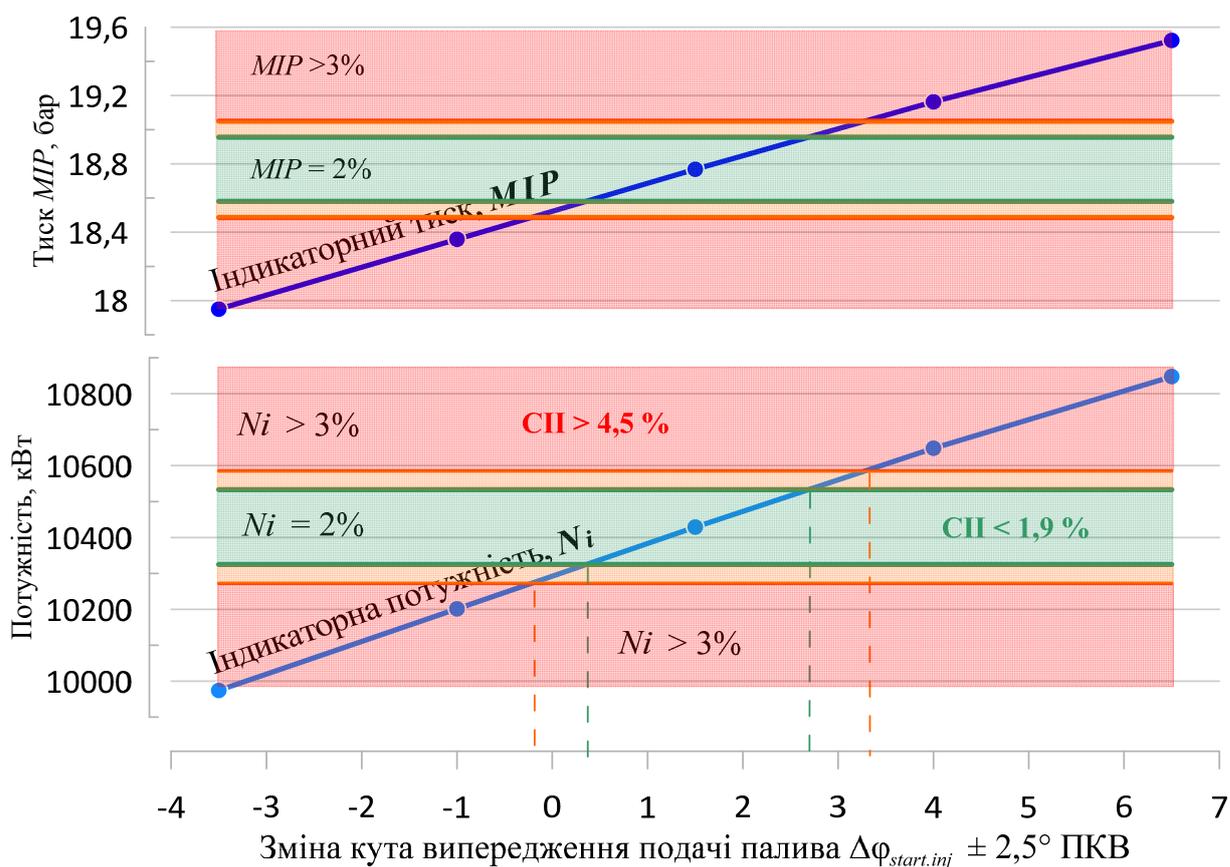


Рисунок 11 – Зміна індикаторної потужності N_i та середнього індикаторного тиску MIP для ГД MAN 7S50MC

Дослідження зосереджувалось на встановленні функціональних залежностей між індексом нерегулярності циклу CI_p і варіативністю кута випередження впорскування палива $\Delta\varphi_{adv}$ з одного боку, та зміною індикаторної потужності N_i і середнього індикаторного тиску MIP з іншого боку. Це дозволило створити науково

обґрунтовану систему діагностичних критеріїв, адаптовану до специфіки двигуна та узгоджену з міжнародними нормативними вимогами, див. табл. 3.

Таблиця 3 – Діапазони критеріїв варіативності: індекс нерегулярності циклу CI_p та варіативність кута випередження впорскування палива $\Delta\varphi_{adv}$ для головних двигунів *MAN 7S50MC*, *Wuxi G8300*.

ГД <i>MAN 7S50MC</i>			
CI_p , %	< 1,9 % <i>Normal</i>	1,9...4,5 % <i>Warning</i>	> 4,5 % <i>Alarm</i>
$\Delta\varphi_{adv}$, ° ПКВ	< 2,0 ° <i>Normal</i>	2,0...3,5 ° <i>Warning</i>	> 3,5 ° <i>Alarm</i>
ГД <i>Wuxi G8300</i>			
CI_p , %	< 2,6 % <i>Normal</i>	2,6...6,2 % <i>Warning</i>	> 6,2 % <i>Alarm</i>
$\Delta\varphi_{adv}$, ° ПКВ	< 2,7 ° <i>Normal</i>	2,7...4,5 ° <i>Warning</i>	> 4,5 ° <i>Alarm</i>

В результаті моделювання встановлено кількісні межі значень досліджуваних параметрів, які забезпечують роботу двигуна в межах нормативних вимог. На основі аналізу отриманих залежностей розроблено систему градації технічного стану двигуна за трьома рівнями, табл. 3: зелений сектор (нормальний стан), жовтий сектор (потребує підвищеної уваги), червоний сектор (незадовільний стан).

Встановлені діапазони значень, табл. 3, базуються на комплексному підході, що поєднує міжнародні нормативні вимоги морських класифікаційних товариств з результатами детального чисельного моделювання в онлайн-сервісі *Blitz-PRO* для конкретних типів двигунів. Це забезпечує практичну застосовність розроблених критеріїв та їх високу надійність при діагностиці реальних силових установок різних типів суднових дизелів.

Результати порівняння підтверджують гіпотезу про залежність діагностичних критеріїв від конструктивного типу двигуна. Малообертні 2-тактні двигуни демонструють більшу чутливість до циклових варіацій та потребують жорсткіших діагностичних критеріїв порівняно з середньообертними 4-тактними двигунами.

Дослідження проводилося на основі моделювання робочого циклу суднових двигунів: малообертного двотактного головного двигуна *MAN 7S50MC*, чотиритактного середньообертного головного двигуна *Wuxi G8300*; чотиритактних суднових дизель-генераторів: *Wartsila 6L20* і *WeiChai (Deutz 226)*. Для кожного двигуна промодельовані характерні випадки відхилень: зміна кута випередження подачі палива $\Delta\varphi_{start.inj} = \pm 1^\circ$ ПКВ, зміна тривалості впорскування палива $\Delta\varphi_{inj} = \pm 1^\circ$ ПКВ, зміна фази відкриття випускного клапана $\Delta\varphi_{EVO} = \pm 2,5^\circ$ ПКВ, зміна фази закриття випускного клапана $\Delta\varphi_{EVC} = \pm 2,5^\circ$ ПКВ.

На рис. 12 представлено результати порівняльного аналізу коефіцієнта варіації COV для чотирьох принципово різних типів двигунів, що охоплюють весь спектр сучасних суднових енергетичних установок.

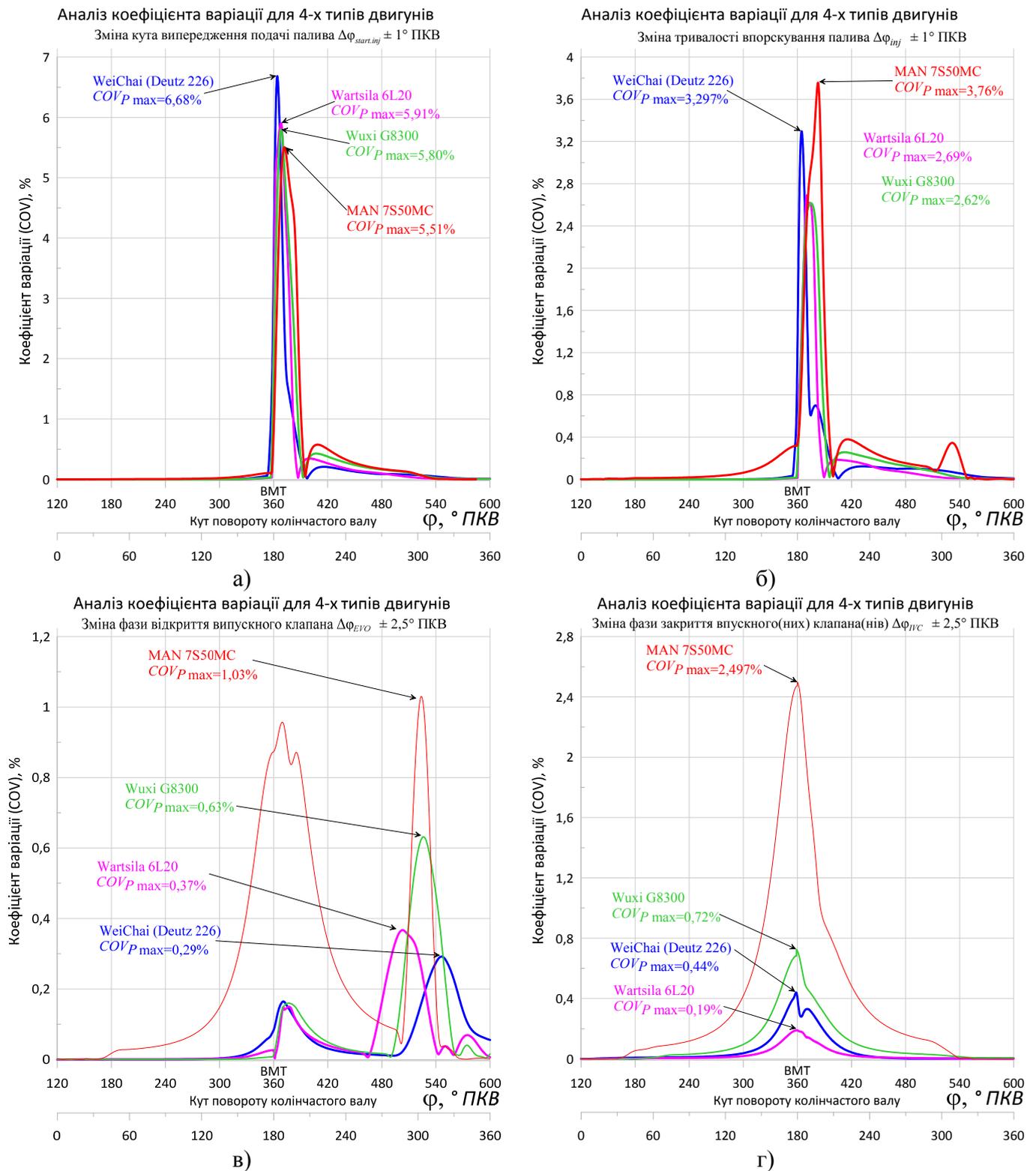


Рисунок 12 – Аналіз коефіцієнта варіації COV для 4-х типів двигунів (режим MCR):
 а) зміна кута випередження подачі палива $\Delta\varphi_{start.inj}$; б) зміна тривалості впорскування палива $\Delta\varphi_{inj}$; в) зміна фази відкриття випускного клапана $\Delta\varphi_{EVO}$; г) зміна фази закриття випускного клапана $\Delta\varphi_{EVC}$

Ключовим результатом порівняльного аналізу є встановлення факту відносно однакової форми діаграм поточних значень коефіцієнта варіації COV для всіх досліджуваних типів двигунів, незважаючи на кардинальні відмінності в їх

конструкції, принципі роботи та експлуатаційних характеристиках. Спостерігається послідовність у локалізації максимумів COV – для всіх двигунів відхилення паливоподачі призводять до піків варіативності на фазі згоряння, при цьому форма кривих COV зберігає подібність незалежно від типу двигуна, а відносні величини максимумів корелюють з типом відхилення, а не з конструктивними особливостями силової установки.

Розроблений метод дозволяє не лише виявити наявність нестабільності робочого процесу, але й ідентифікувати її першопричину, що критично важливо для ефективної діагностики та подальшого усунення несправностей як паливної апаратури високого тиску при відхиленнях у фазах подачі палива, так і механізму газорозподілу при порушеннях фаз роботи клапанів.

Порівняльний аналіз впливу різних типів несправностей на діагностичні критерії. На рис. 13 представлено результати порівняльного аналізу чутливості трьох діагностичних критеріїв (максимальне значення коефіцієнта варіації $COV_{P_{max}}$, середнє значення $\overline{COV_p}$ та індекс нерегулярності циклу CI_p) до різних типів експлуатаційних відхилень для чотирьох репрезентативних типів суднових дизельних двигунів, від малообертних двотактних до високообертних чотиритактних двигунів. Дослідження виконано з метою встановлення універсальної ієрархії впливу несправностей на стабільність робочого процесу та обґрунтування пріоритетів технічного обслуговування різних систем двигуна.

Комплексний аналіз результатів моделювання чітко демонструє, що дефекти в роботі паливоподачі здійснюють максимальний вплив на нестабільність робочого процесу та чисельні значення діагностичних критеріїв порівняно з іншими типами несправностей, незалежно від конструктивного типу досліджуваного двигуна. Ця закономірність проявляється однаково для всіх досліджуваних силових установок, що підтверджує фундаментальний характер впливу паливної системи на циклову варіативність дизельних двигунів.

Найбільший вплив на діагностичні критерії здійснює зміна кута випередження подачі палива, що проявляється у зростанні значень коефіцієнта варіації на 180...250 % порівняно з номінальними параметрами для всіх типів досліджуваних двигунів. Така висока чутливість пояснюється критичною залежністю процесу згоряння від точності синхронізації подачі палива з положенням поршня: навіть незначні відхилення кута випередження на $\pm 1...2^\circ$ ПКВ призводять до кардинального порушення оптимальних умов сумішоутворення та тепловиділення, що відображається у зростанні циклічної варіативності всіх основних параметрів робочого процесу.

Середній рівень впливу характерний для зміни тривалості впорскування палива, що викликає зростання діагностичних критеріїв на 120...180 % відносно базових значень. Тривалість впорскування безпосередньо визначає якість розпилювання палива, повноту згоряння та характер тепловиділення, проте її вплив дещо менший через можливість часткової компенсації відхилень автоматичними системами регулювання двигуна та більшу толерантність процесу згоряння до зміни цього параметра порівняно з кутом випередження подачі.

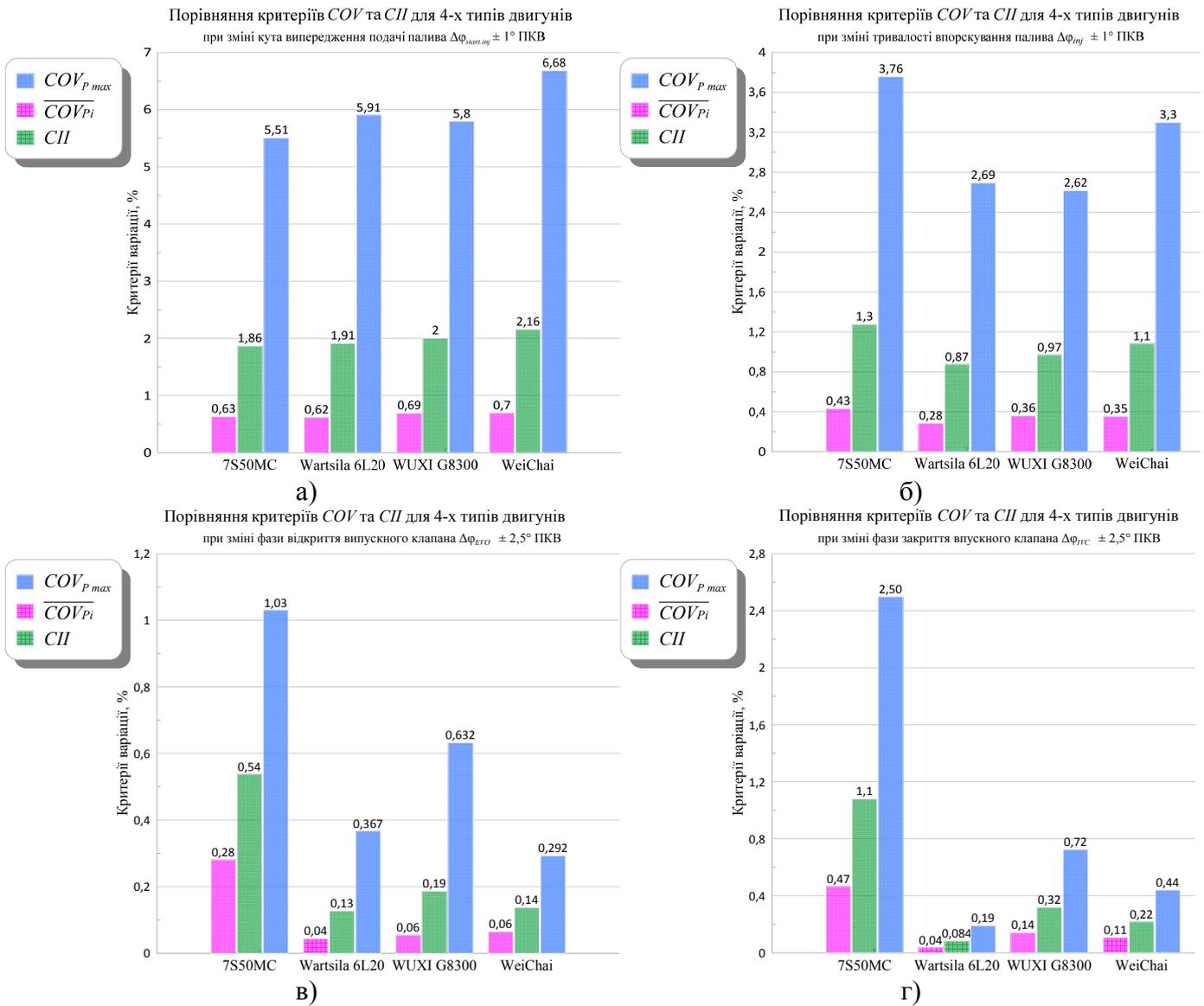


Рисунок 13 – Порівняння 3-х діагностичних критеріїв для 4-х типів двигунів (режим MCR): а) зміна кута випередження подачі палива $\Delta\varphi_{start.inj}$; б) зміна тривалості впорскування палива $\Delta\varphi_{inj}$; в) зміна фази відкриття випускного клапана $\Delta\varphi_{EVO}$; г) зміна фази закриття випускного клапана $\Delta\varphi_{EVC}$

Менш критичний вплив спостерігається при зміні фази закриття випускного клапана, що призводить до підвищення діагностичних критеріїв на 80...130 % залежно від типу двигуна. Відхилення цього параметра в першу чергу впливає на ефективність наповнення циліндра та фактичний ступінь стиснення, що опосередковано позначається на стабільності робочого процесу через зміну початкових умов для згорання, але не здійснює прямого впливу на критично важливі процеси сумішоутворення та тепловиділення.

Найменший вплив на нестабільність робочого процесу здійснює зміна фази відкриття випускного клапана, що викликає підвищення діагностичних критеріїв лише на 40...80 % для різних типів двигунів. Цей параметр переважно визначає ефективність випуску продуктів згорання та має обмежений прямий вплив на процеси, що відбуваються в циліндрі під час фаз впуску, стиснення та згорання, тому його варіації найменш критичні для загальної стабільності робочого циклу.

Встановлена ієрархія впливу несправностей науково обґрунтовує та підтверджує правильність традиційної інженерної практики морського транспорту, яка надає першочергове значення точності регулювання систем паливоподачі при технічному обслуговуванні суднових дизельних двигунів.

Метод визначення поточного технічного стану двигунів на основі співставлення діагностичних параметрів з даними морських випробувань *Sea Trials*. Ключовим завданням технічної діагностики суднових двигунів є оперативне та достовірне порівняння поточних експлуатаційних параметрів з еталонними значеннями, які були зафіксовані під час проведення морських випробувань *Sea Trials*, див. табл. 4. Саме ці випробування дають змогу отримати базові характеристики роботи силової установки у справному стані та зафіксувати їх як відправну точку для подальших діагностичних оцінок.

У роботі розвинуто метод визначення поточного технічного стану суднових дизельних двигунів шляхом співставлення виміряних у процесі експлуатації діагностичних параметрів з даними морських випробувань, апроксимованими за допомогою регресійних моделей. Використання методів регресійного аналізу дозволяє не лише визначати статистично значущі моделі для кожного параметра, але й здійснювати порівняння отриманих під час роботи даних із еталонними характеристиками *Sea Trials* на будь-якому режимі навантаження, що забезпечує безперервність і гнучкість діагностики, див. рис. 14.

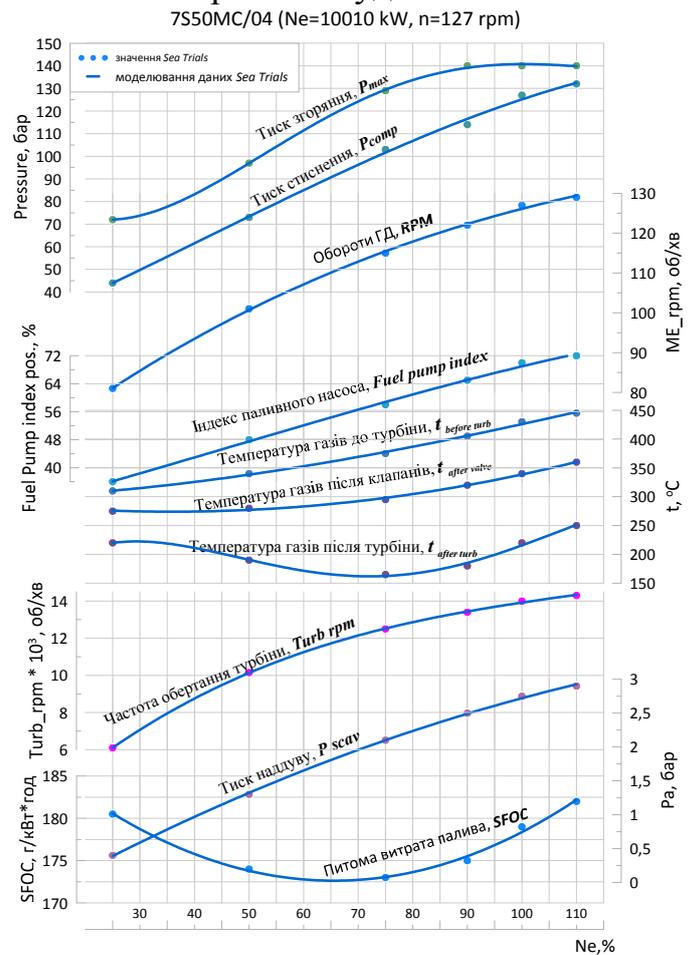
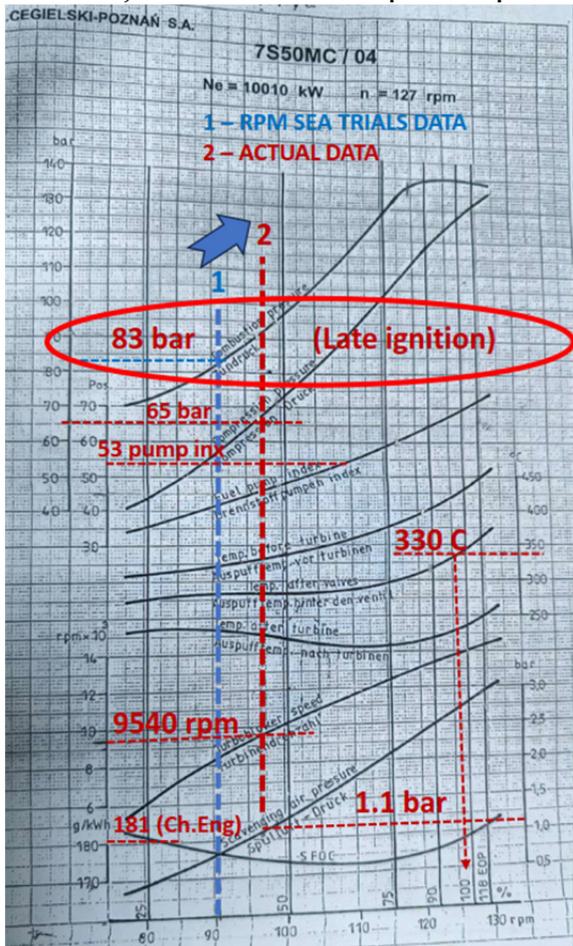
Основним недоліком існуючої практики є те, що еталонні значення, отримані під час *Sea Trials*, фіксуються лише для обмеженої кількості точок робочої характеристики – як правило, це шість режимів роботи двигуна: 25 %, 50 %, 75 %, 90 %, 100 % та 110 % номінальної потужності. Такий підхід, хоч і достатній для первинної оцінки характеристик силової установки, виявляється недостатньо ефективним для аналізу її стану в реальних умовах експлуатації. У ході суднових рейсів до 70 % загального часу роботи двигуна припадає саме на проміжні режими, що знаходяться між зазначеними контрольними точками.

Таблиця 4 – Офіційні дані морських випробувань для двигуна 7S50MC (*Sea Trials*)

<i>N_e</i> , %	<i>ME rpm</i>	<i>Turb rpm</i>	<i>t</i> before <i>turb</i> , °C	<i>t</i> after <i>turb</i> , °C	<i>P</i> _{scav} bar	<i>P</i> _{max} bar	<i>P</i> _{comp} bar	<i>SFOC</i> g/kWh
25	81	6150	310	220	0,38	72	44	180,5
50	101	10150	340	190	1,3	97	73	174
75	115	12500	375	165	2,1	129	103	173
90	122	13400	405	180	2,5	140	114	175
100	127	14000	430	220	2,75	140	127	179
110	129	14300	445	250	2,9	140	132	182

Відсутність еталонних даних для цих проміжних режимів значно ускладнює своєчасне виявлення початкових ознак деградації вузлів та агрегатів. Як наслідок, діагностичні системи втрачають здатність до раннього прогнозування відмов, а обслуговування часто здійснюється за реактивним принципом – лише після прояву

суттєвих відхилень у роботі двигуна. Це призводить до зниження надійності силової установки, збільшення витрат на ремонт та можливих простоїв судна.



а)

б)

Рисунок 14 – Регресійне моделювання даних морських випробувань *Sea Trials* для малооборотного двигуна *MAN 7S50MC*: а) еталонні значення *Sea Trials* для шести режимів роботи двигуна: 25%, 50%, 75%, 90%, 100% та 110% номінальної потужності; б) результати регресійне моделювання даних *Sea Trials* для всього діапазона потужності ГД

Для подолання цих обмежень у роботі запропоновано метод регресійного моделювання, який дозволяє відновлювати еталонні значення діагностичних параметрів для будь-якого проміжного режиму навантаження, використовуючи лише обмежений набір даних *Sea Trials*. Основою методу є алгоритм поліноміальної апроксимації, який забезпечує високу точність інтерполяції між наявними точками вимірювань та статистично обґрунтовану екстраполяцію за їх межами, зберігаючи фізичну інтерпретованість отриманих залежностей.

Розроблений алгоритм складається з двох послідовних етапів. На першому етапі для кожного діагностичного параметра створюється індивідуальна поліноміальна регресійна модель виду:

$$y(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_nx^n \tag{34}$$

де $a_0, a_1, a_2, \dots, a_j$ – коефіцієнти поліномів, що апроксимують криву, визначаються за допомогою методу найменших квадратів; x – рівень навантаження двигуна; y – значення діагностичного параметра.

Ця модель математично описує функціональний зв'язок між конкретним параметром та рівнем навантаження двигуна. Коефіцієнти полінома визначаються методом найменших квадратів через розв'язання системи нормальних рівнянь. Такий підхід дозволяє математично описати функціональний зв'язок між конкретним параметром і рівнем навантаження двигуна з мінімальною похибкою.

Другий етап передбачає визначення ступеня полінома через комплексний аналіз трьох ключових статистичних критеріїв, див. табл. 5. Коефіцієнт детермінації R^2 оцінює якість моделі – чим ближче його значення до 1,0, тим краще модель описує експериментальні дані. Коефіцієнт кореляції R підтверджує адекватність моделі, демонструючи її здатність відображати реальні фізичні процеси в двигуні. Сума квадратів залишків мінімізується для досягнення найменшої похибки апроксимації, що гарантує максимальну точність прогнозних розрахунків.

Таблиця 5 – Поліноміальна модель для частоти обертання турбокомпресора
 $Turb\ rpm = f(N_e, \%)$

Регресійна модель: $Turb\ rpm =$	$y(x) = -176,30385 + 304,79025 x - 2,3086228 x^2 + 0,0067006 x^3$
Коефіцієнти поліному:	$a_0 = -176,30385$ $a_1 = 304,79025$ $a_2 = -2,3086228$ $a_3 = 0,0067006$
Ступінь поліному:	3
Аналіз статистичних критеріїв:	Коефіцієнт детермінації, $R^2 = 0,9997834$ Коефіцієнт кореляції, $R = 0,9998917$

Метод дозволяє здійснювати порівняння вимірних експлуатаційних даних із еталонними значеннями *Sea Trials* на будь-якому режимі навантаження, а не лише в обмежених фіксованих точках морських випробувань, див. рис. 15б.

Ідентифікація типів несправностей на основі математичного моделювання в онлайн-сервісі *Blitz-PRO*. Проведено комплексне моделювання найпоширеніших несправностей систем паливоподачі і газорозподілу суднових дизелів, зокрема: пізнього та раннього впорскування палива, аномального багаторазового впорскування, несправностей системи газорозподілу випускного клапана, негерметичності випускного клапана, а також варіативності впорскування палива при роботі двигуна на часткових навантаженнях. Для кожного типу несправності визначено характерні ознаки на індикаторних діаграмах та відповідні зміни у вібродіаграмах. Дослідження проводилося на основі моделювання робочого циклу суднового двигуна *MAN 6S60MC-C*.

Математична модель дозволяє не лише ідентифікувати характерні ознаки різних несправностей, але й кількісно оцінити їх вплив на експлуатаційні характеристики двигуна. Зокрема, встановлено, що навіть незначні відхилення у

моментах впорскування палива призводять до суттєвих змін у індикаторних показниках, таких як середній індикаторний тиск та індикаторна потужність.

Результати математичного моделювання підтвердили ефективність комбінованого аналізу індикаторних діаграм тиску та вібродіаграм паливної апаратури і механізму газорозподілу для діагностики технічного стану двигуна. Доведено, що застосування вібраційного датчика на магнітній платформі як частини портативної діагностичної системи дозволяє отримувати цінну інформацію про час підйому та посадки голки форсунки, циркуляцію палива в системі впорскування, а також час відкриття та закриття клапанів.

Метод діагностики, заснований на аналізі вібраційних сигналів, відповідає вимогам морських класифікаційних товариств щодо неруйнівного контролю та дозволяє отримувати діагностичну інформацію, яка раніше була доступна лише в лабораторних умовах, безпосередньо під час експлуатації двигуна.

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.

Запропоновано 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, див. рис. 15.

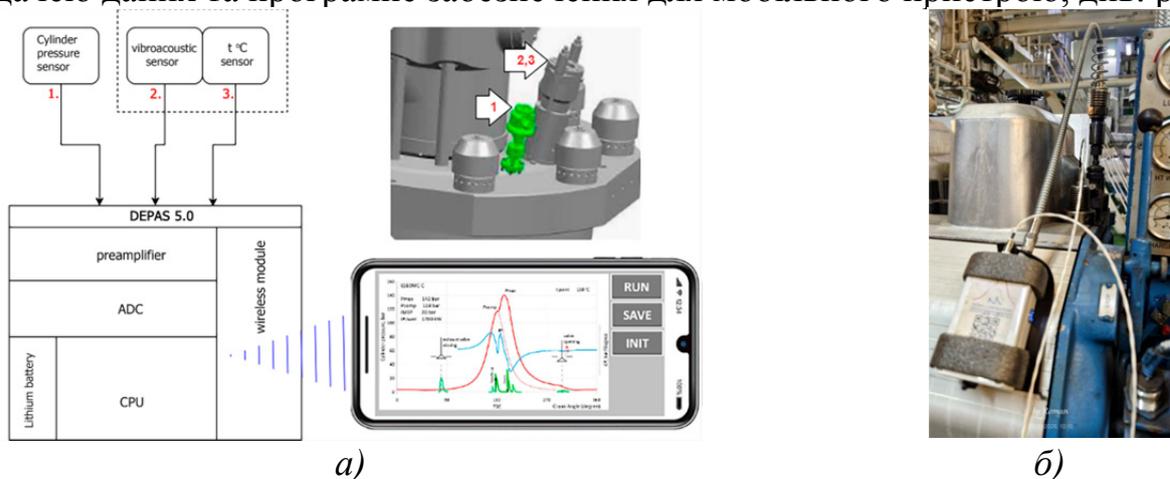


Рисунок 15 – Запропонована концепція системи діагностики морських дизельних двигунів реального часу: а) структура системи діагностики реального часу; б) система діагностики реального часу *DEPAS 5.0W*

Апаратна частина системи складається з датчика тиску, вібродатчика та опціонального датчика температури, рис. 15. Підсилювачі сигналів датчиків і мікроконтролер розташовані в невеликому боксі, там же знаходяться літєві джерела живлення та контролер заряду. Розрахункова та графічна частини виконані на сучасному смартфоні або планшеті.

Таким чином вирішується важливе завдання експлуатації – зробити контроль робочого процесу суднових двигунів доступним широкому колу морських інженерів. Фактично інженер отримує лише необхідний набір датчиків та один

вимірювальний блок, див. рис 16. Усі розрахунки та відображення діаграм виконує персональний гаджет, зв'язок з яким здійснюється через *Bluetooth*. Таке рішення мінімізує обсяг апаратної частини та потенційну вартість системи діагностування.

Розроблена технологія діагностики судових дизелів у режимі реального часу базується на інноваційному підході до збору, обробки та аналізу даних про робочий процес двигуна. 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.



Рисунок 16 – Практичне застосування розроблених методів в системі діагностування реального часу *DEPAS 5.0W* для ДГ *Wartsila 6L20*

Система функціонує у двох режимах: «швидкого сканування» для оперативної оцінки параметрів робочого процесу, див рис. 17, 18 та «режимі поглибленого аналізу», рис. 19, для детальної діагностики технічного стану, див. табл. 6, 7.

Таблиця 6 – Робочі параметри двигуна, що визначаються в режимі швидкого сканування та в режимі поглибленого аналізу

---- режим швидкого сканування в реальному часі	
RPM	Оберти двигуна за хвилину, xv^{-1}
$P_{max}(P_z)$	Максимальний тиск згоряння та відповідний кут колінчастого валу, бар/ °ПКВ
COV_{P_i}	Коефіцієнт варіації тиску, %
$COV_{P_{max}}$	Коефіцієнт варіації максимального тиску згоряння, %
CI_p	Індекс нерегулярності циклів (тиск), %
$\Delta\varphi_{adv}$	Варіація фаз впорскування палива, °ПКВ
$\Delta\varphi_{inj}$	Варіація тривалості впорскування палива в циліндр, °ПКВ
$\Delta\varphi_{valve}$	Варіація кутів закриття клапанів, °ПКВ

Режим «швидкого сканування» забезпечує оперативне обчислення основних діагностичних параметрів, таких як частота обертання колінчастого валу, максимальний тиск згоряння, коефіцієнт варіації тиску, індекс нерегулярності циклів та варіації фаз подачі палива і газорозподілу. Цей режим дозволяє інженеру швидко оцінити загальний стан двигуна та виявити потенційні проблеми.

На рис. 17 представлено робочий інтерфейс системи діагностування *DEPAS 5.0W* під час виявлення дефектів впорскування палива в реальному часі, що демонструє практичну ефективність розроблених діагностичних критеріїв. Діаграма поточних значень коефіцієнта варіації COV_p розраховується паралельно з індикаторною діаграмою, забезпечуючи синхронний аналіз термодинамічних процесів у циліндрі та їх циклової стабільності, що дозволяє технічному персоналу отримувати комплексну інформацію про стан двигуна в режимі реального часу.

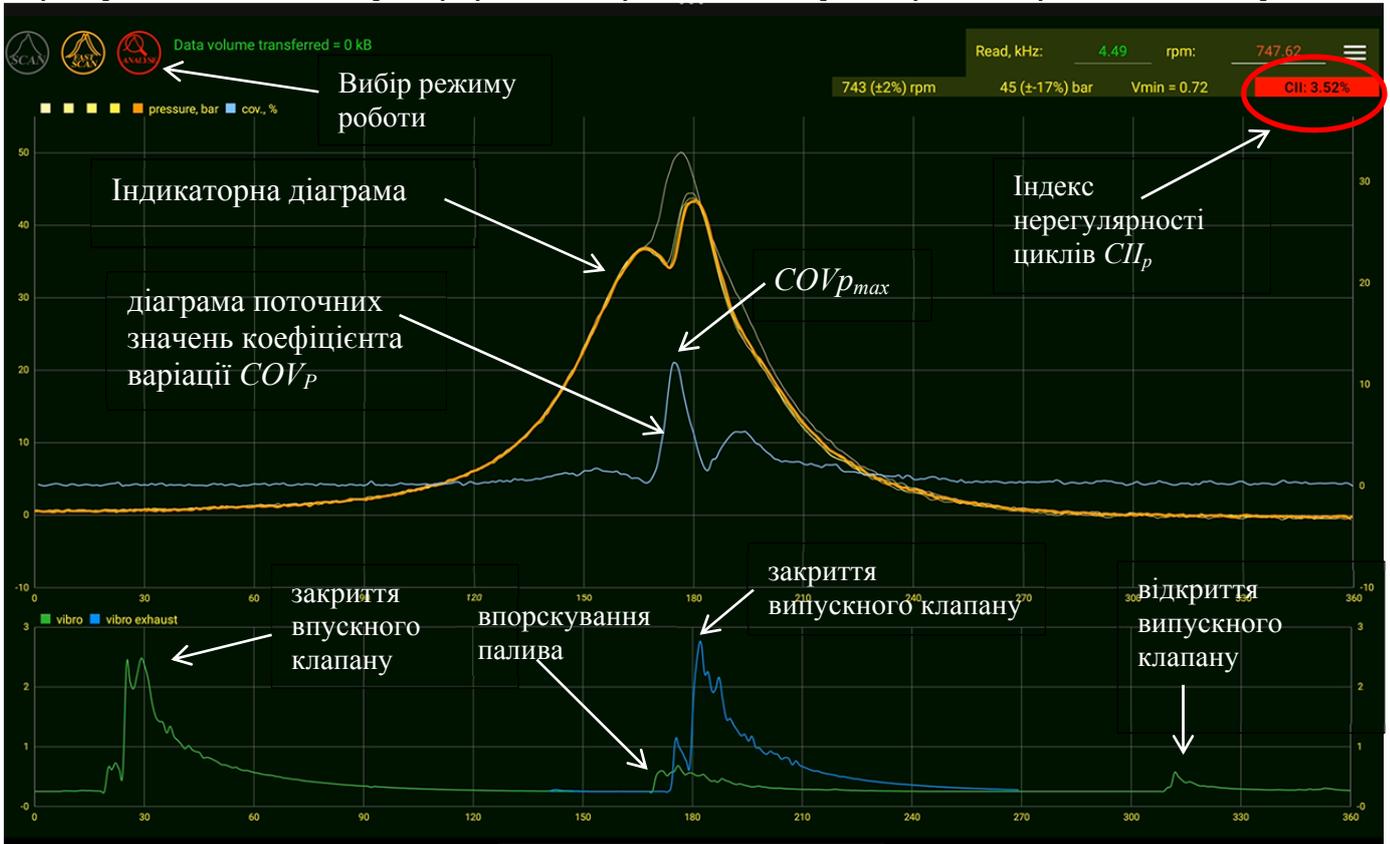


Рисунок 17 – Робота системи *DEPAS 5.0W* в режимі швидкого сканування для лабораторного дизель-генератора *NVD24* (4Ч17,5/24) при виявленні дефектів впорскування палива

Ключовою діагностичною ознакою на рис. 17 є локалізація максимального відхилення COV_{pmax} саме на ділянці згоряння, що однозначно характеризує природу виявленого дефекту як порушення в системі впорскування палива. Ця закономірність повністю корелює з теоретичними передбаченнями розробленого методу, підтверджуючи його практичну придатність для ідентифікації типу несправності за характером розподілу циклової варіативності по фазах робочого циклу двигуна.

У правій верхній частині екрана система відображає критичне значення індексу нерегулярності циклу $CII = 3,52\%$, що потрапляє в червоний сектор градації технічного стану та сигналізує про незадовільний стан двигуна. Згідно з встановленими діагностичними критеріями, такий рівень індексу нерегулярності відповідає зміні індикаторної потужності N_i та середнього індикаторного тиску MIP більше ніж на 3%, що значно перевищує нормативні вимоги морських класифікаційних товариств та вказує на необхідність негайного технічного

втручання для запобігання аварійним ситуаціям або серйозним пошкодженням двигуна.

Нижня частина інтерфейсу демонструє унікальну можливість системи *DEPAS 5.0W* – аналіз вібродіаграм механізму газорозподілу та системи впорскування палива, що синхронізовані з індикаторною діаграмою по куту повороту колінчастого валу, включаючи моніторинг підйому та посадки голки форсунки. Вібродіагностика забезпечує додатковий канал інформації про технічний стан критично важливих систем двигуна, дозволяючи виявляти механічні дефекти, які можуть не проявлятися безпосередньо в термодинамічних параметрах робочого процесу.

Аналіз вібродіаграм на рис. 17 виявляє характерні ознаки несправності системи впорскування. Чітко видимі віброімпульси закриття впускного клапана, позначені зеленим кольором, та закриття випускного клапана, відображені синім кольором, свідчать про нормальну роботу газорозподільного механізму з чіткими фронтами спрацьювання та відсутністю аномальних коливань. Однак віброімпульси, пов'язані з роботою форсунки: підйом та посадка голки виглядають невиразно та розмито, що є характерною ознакою дефекту впорскування палива.

Присутній розмазаний віброімпульс впорскування без чіткого фронту підйому голки форсунки та відсутність виразного імпульсу посадки голки вказують на можливі проблеми з механічною частиною форсунки, такі як зношення направляючих втулок голки, порушення герметичності сідла голки, забруднення розпилювача або зниження пружності пружини голки. Такі дефекти призводять до порушення характеру руху голки форсунки, нестабільності моменту початку та завершення впорскування, що безпосередньо корелює з підвищенням циклової варіативності процесу згоряння, зафіксованим системою через аналіз коефіцієнта варіації.

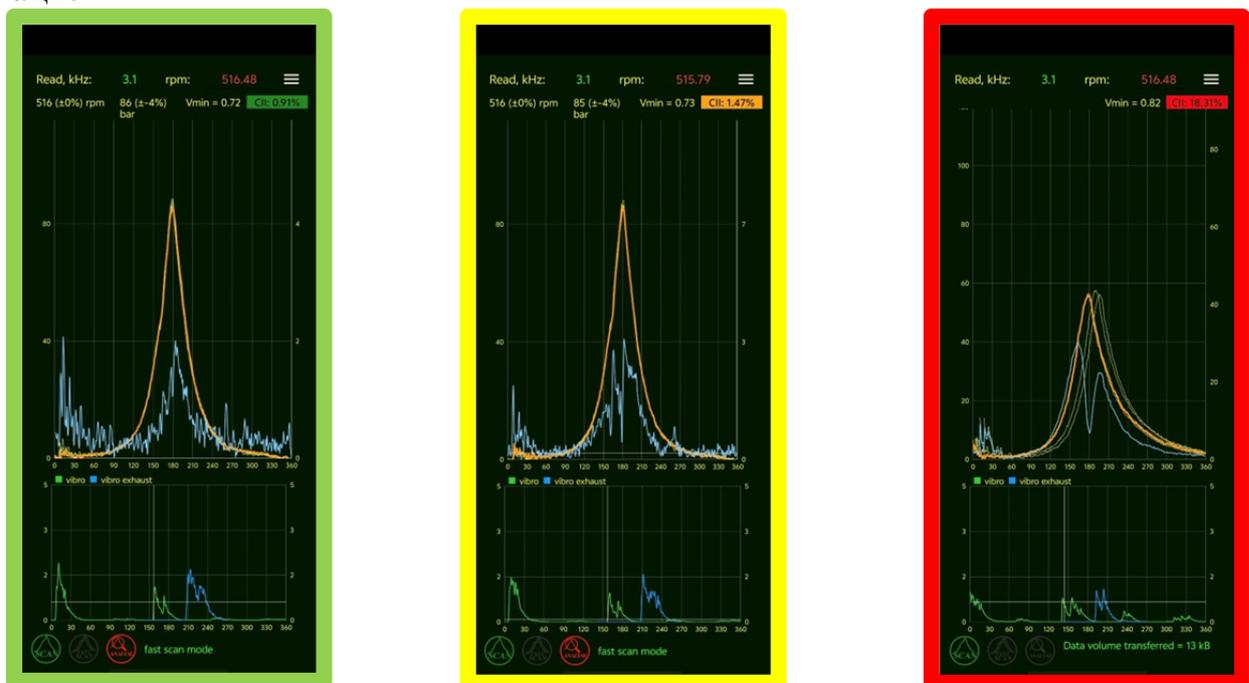


Рисунок 18 – Рівні індексу нерегулярності циклів CII_p (режим швидкого сканування системи *DEPAS 5.0W* для лабораторного дизель-генератора *WeiChai*)

Аналіз варіативності робочих циклів: здійснюється шляхом обчислення розроблених діагностичних критеріїв (COV_{Pmax} , $CIIP$, $\Delta\phi_{adv}$, $\Delta\phi_{inj}$, $\Delta\phi_{valves}$), що дозволяє виявити нестабільність роботи паливної апаратури та механізму газорозподілу.

Режим «поглибленого аналізу» активується після виявлення відхилень у режимі швидкого сканування або для проведення планової діагностики, див. рис 19. В цьому режимі обчислюються уточнена позиція ВМТ, середній індикаторний тиск, індикаторна потужність, параметри процесу згоряння і газорозподілу. Результати представляються у вигляді індикаторних діаграм $P(\phi)$, діаграм швидкості зміни тиску $dP/d\phi$ та вібродіаграм.

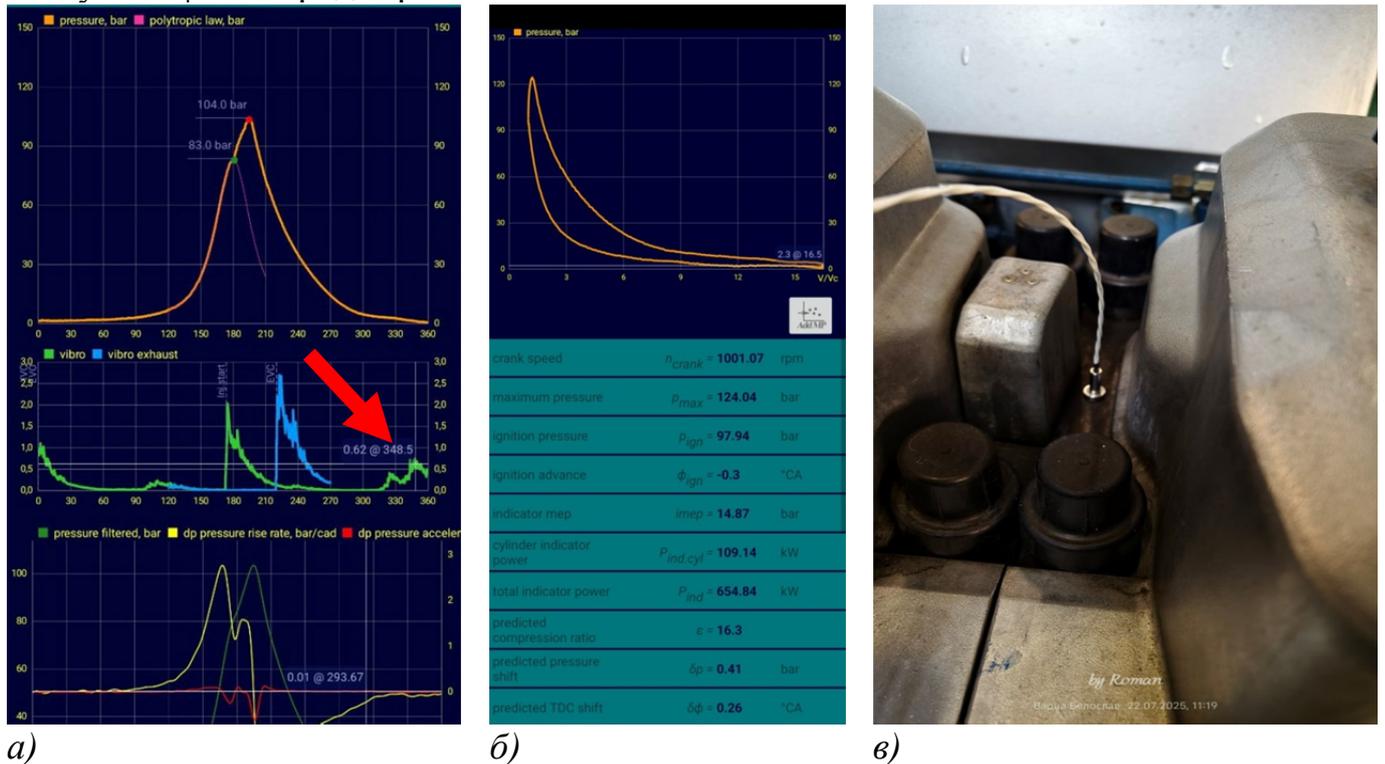


Рисунок 19 – Результати роботи системи *DEPAS 5.0W* в режимі аналізу для дизель-генератора *Wartsila 6L20*: а) індикаторна діаграма з вібродіаграмою та діаграмою швидкості зміни тиску $dP/d\phi$; б) PV -діаграма та робочі параметри; в) місце встановлення вібродатчика

Центральне місце в інтерфейсі займає індикаторна діаграма, яка відображає зміну тиску в циліндрі протягом повного робочого циклу та служить основою для синхронізації всіх інших діагностичних сигналів за кутом повороту колінчастого валу.

Нижче індикаторної діаграми розташовані синхронізовані вібродіаграми механізму газорозподілу та системи впорскування палива, що забезпечують комплексну оцінку технічного стану ключових систем двигуна в реальному часі. Вібросигнали від газорозподільного механізму чітко відображають моменти спрацювання клапанів: закриття впускного клапана позначено зеленим кольором, закриття випускного клапана - синім кольором, а особливістю даної версії системи є наявність віброімпульса відкриття випускного клапана, позначеного червоною стрілкою. Така деталізація дозволяє контролювати повний цикл роботи

газорозподільного механізму та виявляти потенційні проблеми на ранніх стадіях розвитку.

Аналіз віброімпулсів від системи впорскування палива демонструє характеристики справної паливної апаратури: спостерігається чіткий фронт підйому голки форсунки, що відповідає початку впорскування, та спадаючий імпульс посадки голки форсунки при завершенні процесу подачі палива. Така форма віброімпулсів характеризує справність системи впорскування палива та відсутність типових дефектів, які зазвичай призводять до розмивання та деформації віброімпулсів.

Система також відображає діаграми швидкості зміни тиску $dP/d\phi$, які характеризують характер робочого процесу двигуна та дозволяють класифікувати тип згоряння палива. У представленому випадку спостерігається характерне «м'яке» згоряння, при якому швидкість зміни тиску на ділянці згоряння менша за швидкість на ділянці стиснення, що свідчить про оптимальні умови сумішоутворення та плавний перебіг процесу тепловиділення без різких піків тиску. Це контрастує з «жорстким» згорянням, коли максимум першої похідної на ділянці згоряння перевищує відповідне значення на ділянці стиснення, що може призводити до підвищених механічних навантажень на деталі кривошипно-шатунного механізму.

Таблиця 7 – Робочі параметри двигуна, що визначаються в режимі поглибленого аналізу

----- режим аналізу	
$P_{max} (P_z) corrected$	Максимальний тиск згоряння при відповідному куті повороту колінчастого валу, бар/ °ПКВ
$P_{comp} (P_c)$	Тиск кінця стиснення, бар
MIP	Середній індикаторний тиск, бар
N_i	Індикаторна потужність циліндра, кВт
$P_{ignition} (P_{ign})$	Тиск початку згоряння та відповідний кут колінчастого валу, бар/ °ПКВ
<i>Fuel Injection timing</i>	Реальні та геометричні фази впорскування палива, °ПКВ
<i>Valves timing</i>	Фази газорозподілу впускних і випускних клапанів, °ПКВ
<i>Fuel ignition delay</i>	Час від початку впорскування до початку згоряння, °ПКВ /мс
<i>DeltaG</i>	Різниця між реальною та геометричною фазами впорскування палива, °ПКВ

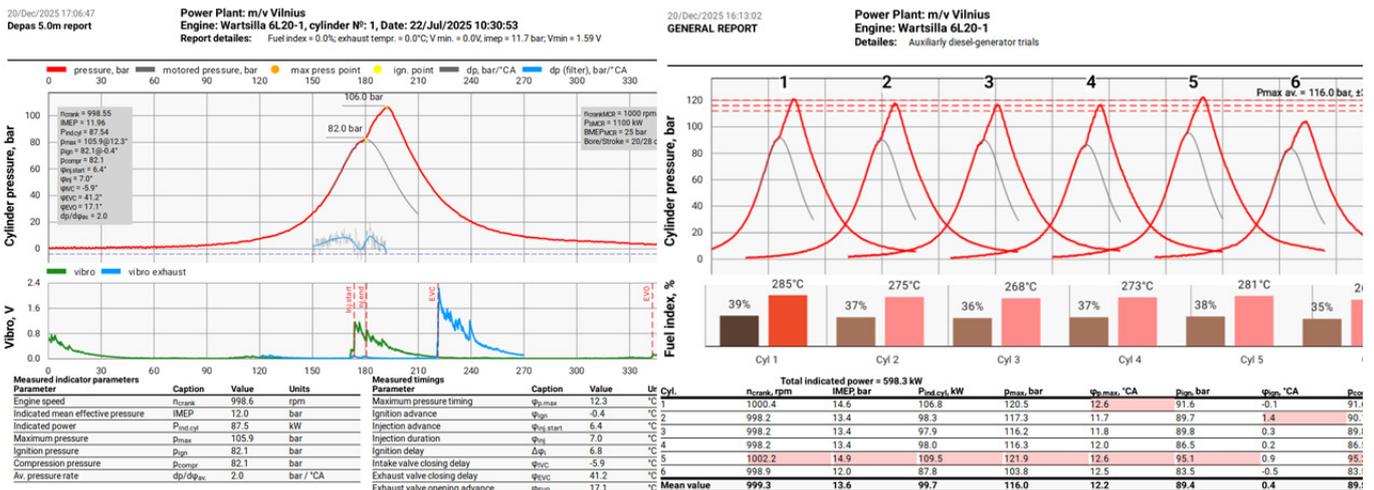
На рис. 19б представлено PV -діаграму та результати розрахунку основних робочих параметрів двигуна, табл. 7, що дозволяє оцінити термодинамічну ефективність робочого циклу, індикаторну потужність циліндра, середній індикаторний тиск та інші критично важливі показники, які характеризують енергетичну ефективність перетворення хімічної енергії палива в механічну роботу. Автоматичний розрахунок цих параметрів забезпечує оперативну оцінку технічного стану двигуна та дозволяє виявляти тенденції зміни його характеристик у часі.

Рис. 19в демонструє характерне місце встановлення вібродатчика біля гайки шпильки на кришці циліндра для двигуна *Wartsila 6L20*, що є оптимальним для

реєстрації вібрацій як від газорозподільного механізму, так і від системи впорскування палива.

На рис. 20 представлено інтерфейс звітної підсистеми *DEPAS 5.0W*, що демонструє можливості автоматизованого формування діагностичних звітів на двох рівнях деталізації. Рис. 20а відображає результати діагностування окремого циліндра з детальним аналізом його індивідуальних характеристик, тоді як рис. 20б представляє зведені результати діагностування для всіх циліндрів двигуна, що забезпечує комплексну оцінку технічного стану силової установки в цілому.

Система формує структуровані діагностичні звіти, які забезпечують контроль робочого процесу суднових двигунів у формі, доступній широкому колу морських інженерів незалежно від їх рівня спеціалізації в галузі технічної діагностики. Індивідуальний звіт для окремого циліндра включає детальну інформацію про ключові параметри робочого процесу та фази газорозподілу і паливopoдaчі. Зведений звіт для всіх циліндрів забезпечує порівняльний аналіз роботи окремих циліндрів двигуна, виявлення нерівномірності навантаження та ідентифікацію циліндрів з відхиленнями від номінальних характеристик.



а) результат діагностування окремо для одного циліндра

б) зведені результати діагностування для всіх циліндрів

Рисунок 20 – Звіти системи *DEPAS 5.0W* для дизель-генератора *Wartsila 6L20*

Методи визначення параметрів робочого процесу передбачають аналіз кількох послідовних циклів двигуна, тому виведення розрахункових параметрів та діаграм відбувається з деякою затримкою – у псевдо-режимі реального часу. Такий режим називатиметься «режимом реального часу», і таке припущення можна вважати прийнятним для завдань діагностики морських двигунів під час експлуатації.

Дослідження здійснювались на лабораторних дизель-генераторах кафедри СЕСК ОНМУ, а також в період проведення діагностичних робіт головних та допоміжних двигунів під час експлуатаційного рейсу т/х «*Vilnius*». А саме: 1) лабораторний дизель-генератор *WeiChai (Deutz 226B)*; 2) лабораторний дизель-генератор *NVD24 (4Ч17,5/24)*; 3) головні двигуни *SKL NVD48 (6VDS 48/42 AL-2)*; 4) дизель-генератори *Wartsila 6L20*, див. рис 21.



Рисунок 21 – Апробація діагностичних критеріїв на лабораторних дизель-генераторах кафедри СЕУ і ТЕ ОНМУ та суднових двигунах т/х «Vilnius»

Результати експериментальної апробації на лабораторних установках та суднових двигунів т/х «Vilnius» засвідчили високу діагностичну точність системи та підтвердили адекватність розроблених методів. Система надійно ідентифікує відхилення від нормального технічного стану, включаючи порушення фаз подачі палива, нестабільність робочих циклів та несправності механізму газорозподілу.

Загалом, при діагностиці морських дизелів, необхідно записувати дані послідовно з усіх циліндрів, намагаючись робити це при однаковому навантаженні та однакових зовнішніх умовах. Однак, завдання діагностики морських двигунів не зводиться лише до визначення середнього індикаторного тиску MIP , індикаторної потужності N_i , максимального тиску згоряння P_{max} тощо. Значно важливішим завданням діагностики є визначення дефектів циліндро-поршневої групи, паливної апаратури високого тиску, механізму газорозподілу та інших вузлів двигунів.

Комплексна оцінка підтвердила перевагу розробленої системи над існуючими аналогами за показниками функціональності, технологічності та ефективності. Впровадження системи дозволяє скоротити час діагностування двигуна, підвищити точність регулювання, знизити питому витрату палива та зменшити витрати на технічне обслуговування.

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.

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 MIP , основних точок тиску P_{max} , P_{comp} , P_{ign} , а також оцінка нестабільності подачі палива та процесу згоряння палива в робочих циліндрах.

ВИСНОВКИ ПО ДИСЕРТАЦІЙНІЙ РОБОТІ

В роботі вирішена важлива науково-прикладна проблема створення теоретичних та методологічних засад для принципово нової портативної системи діагностування технічного стану суднових дизелів, що дозволяє підвищити ефективність експлуатації суднових дизельних двигунів, створити портативні діагностичні системи нового покоління реального часу та отримувати вичерпну діагностичну інформацію щодо поточного стану двигуна.

На основі теоретичних та експериментальних досліджень доводиться робоча гіпотеза, згідно з якою 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.

В результаті розв'язання поставлених науково-практичних задач отримані наступні результати:

1. За результатами аналізу існуючих методів і засобів діагностування суднових дизелів обґрунтовано необхідність розробки нових методів діагностування суднових дизелів, що дозволять проводити діагностику за параметрами робочого процесу в режимі реального часу. Розроблено науково обґрунтовану стратегію підвищення ефективності діагностичного контролю на основі інтеграції цифрових технологій Індустрії 4.0 (цифрових двійників, хмарних обчислень, бездротових сенсорних мереж, інтелектуального аналізу даних) та аналізу циклової варіативності параметрів згоряння, паливоподачі та газорозподілу. Показано, що запропонований підхід дає можливість регулювати двигун та аналізувати результати налаштування систем безпосередньо під час експлуатації. Це підвищує ефективність діагностичного контролю та точність ідентифікації можливих несправностей.

2. Обґрунтовано використання циклової варіативності робочого процесу як діагностичної ознаки технічного стану суднових дизелів. Розроблено метод аналізу зміни коефіцієнта варіації тиску в робочому циліндрі (COV_{Pi}) по куту повороту колінчастого валу. На відміну від існуючих методів, цей підхід дає змогу аналізувати зміну тиску в робочому циліндрі на кожному градусі повороту колінчастого вала, а не лише в точці максимального тиску згоряння, що дає можливість оцінювати стабільність роботи як клапанного механізму, так і паливної апаратури високого тиску. Показано, що залежно від ділянки найбільшого відхилення можна зробити висновок про нестабільність впорскування палива або нестабільну роботу клапанів газорозподілу. Доведено, що застосування цього методу

дозволяє визначити нерівномірність роботи паливної апаратури і газорозподільного механізму по секторах, підвищуючи інформативність технічної діагностики двигуна.

3. Розроблено метод аналізу варіації фаз подачі палива, зокрема кутів початку ($\Delta\varphi_{adv}$), тривалості впорскування палива ($\Delta\varphi_{inj}$) та фаз газорозподілу ($\Delta\varphi_{valves}$), які визначаються за допомогою вібраційного датчика. На відміну від існуючих методів, запропонований підхід дозволяє аналізувати циклові зміни фактичних фаз подачі палива та газорозподілу, що дає змогу оцінювати стабільність роботи паливної апаратури високого тиску та механізму газорозподілу. Доведено, що застосування цього методу дозволяє підвищити оперативність діагностики та здійснювати цілеспрямовані регулювання двигуна безпосередньо під час його експлуатації.

4. Розроблено комплексний показник оцінки нерегулярності робочих циклів (*cycle irregularity index, CI_p*), який враховує середнє та максимальне значення коефіцієнта варіації. На відміну від існуючих показників, CI_p забезпечує інтегральну оцінку варіативності робочого процесу. Доведено, що комплексний показник дає змогу підвищити оперативність і достовірність технічної діагностики суднового двигуна загалом, будучи єдиним сукупним показником числової оцінки технічного стану основних систем двигуна. Показано, що шляхом чисельного моделювання та аналізу експериментально отриманих значень параметрів суднового дизеля встановлено межі значень CI_p для яких зміна індикаторної потужності відбувається в межах: до 2 % (зелений сектор – нормальний стан), 2...3 % (жовтий сектор – потребує підвищеної уваги); більше 3 % (червоний сектор – незадовільний стан).

5. Удосконалено алгоритм визначення ВМТ поршня і подальшої синхронізації даних за відсутності інформації про фактичний ступінь стиснення в циліндрі та тиск наддувочного повітря, що є характерним для сучасних дизелів зі змінними фазами газорозподілу. Показано, що алгоритм визначення ВМТ поршня базується на аналізі ділянки кривої стиснення в циліндрі та не використовує похідні від кривої тиску, які містять високий рівень шуму в експериментальних даних. Удосконалено алгоритм подальшої синхронізації, який визначає початкове положення ВМТ шляхом аналізу діаграм швидкості зміни тиску. Розроблено емпіричну формулу, що пов'язує положення ВМТ з екстремумами першої похідної кривої тиску, враховуючи характер згоряння палива (м'яке або жорстке). Показано, що алгоритм забезпечує достатню для більшості практичних випадків точність і може використовуватись як перше наближення для основного методу.

6. Удосконалено 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 (*cut of frequency $f_c = 15...17$ kHz*). Показано, що паралельний аналіз індикаторних діаграм та вібродіаграм підвищує достовірність діагностики несправностей паливної апаратури та механізму газорозподілу.

7. Розвинуто метод визначення поточного технічного стану двигунів на основі співставлення вимірних діагностичних параметрів з даними морських випробувань

(*Sea Trials*), які визначені за допомогою регресійних моделей. Доведено, що застосування регресійного аналізу дозволяє встановити статистично значущі моделі діагностичних параметрів та здійснювати порівняння вимірених даних із даними *Sea Trials* на будь-якому експлуатаційному режимі навантаження, а не лише в обмежених фіксованих точках морських випробувань.

8. Розвинуто метод визначення параметрів варіативності поточного режиму експлуатації двигуна за допомогою математичного моделювання робочих процесів, реалізованого в онлайн-сервісі *Blitz-PRO*. Показано, що застосування математичної моделі дозволяє передбачати вплив можливих несправностей на експлуатаційні характеристики двигуна. Проведено комплексний аналіз математичної моделі з метою визначення технічного стану підсистем двигуна з точки зору допусків морських класифікаційних товариств: зелений, жовтий, червоний рівні стану.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Перелік статей у закордонних виданнях, проіндексованих у базах даних *Web of Science Core Collection* та/або *Scopus*

1. Zalozh V. Methods of real-time parametric diagnostics for marine diesel engines / R. Varbanets, D. Minchev, Y. Kucherenko, V. Zalozh, O. Kyrylash, T. Tarasenko // Polish Maritime Research. – 2024. – Vol. 31, Issue 3. – P. 71-84. – DOI: <https://doi.org/10.2478/pomr-2024-0037>. (**Scopus Q2**). Автором виконана розробка методів діагностики суднових дизелів в реальному часі в умовах експлуатації.

2. Zalozh V. Digital twin test-bench performance for marine diesel engine applications / D. Minchev, R. Varbanets, O. Shumylo, V. Zalozh, N. Aleksandrovska, P. Bratchenko, Thanh Hai Truong // Polish Maritime Research. – 2023. – Vol. 30, no. 4 (120). – P. 81-91. – DOI: <https://www.doi.org/10.2478/pomr-2023-0061>. (**Scopus Q2**). Автором здійснено налаштування та тестування цифрового двійника для стенду суднових дизельгенераторів.

3. Zalozh V. Concept of vibroacoustic diagnostics of the fuel injection and electronic cylinder lubrication systems of marine diesel engines / R. Varbanets, O. Shumylo, A. Marchenko, D. Minchev, V. Kyrnats, V. Zalozh, N. Aleksandrovska, R. Brusnyk, K. Volovyk // Polish Maritime Research. – 2022. – Vol. 29, no. 4. – P. 88-96. – DOI: <https://doi.org/10.2478/pomr-2022-0046>. (**Scopus Q2**). Автор приймав участь у розробці концепції та методів віброакустичної діагностики системи впорскування палива.

4. Zalozh V. Vibrodiagnostics of marine diesel engines in IMES GmbH systems / S. Neumann, R. Varbanets, D. Minchev, V. Malchevsky, V. Zalozh // Ships and Offshore Structures. – 2022. – DOI: <https://doi.org/10.1080/17445302.2022.2128558>. (**Scopus Q1**). Автор приймав участь в розробці методів вібродіагностики та моделюванні найпоширеніших несправностей суднових дизельних двигунів, здійснював тестування та аналіз розрахунків.

5. Zalozh V. Considerations regarding reducing Danube navigation emissions / T. Tarasenko, V. Zalozh, R. Varbanets, D. Minchev // Scientific Bulletin of Naval

Academy. – 2021. – Vol. XXIV. – P. 174-183. – <https://doi.org/10.21279/1454-864X-21-11-021>. (*Scopus Q4*). Автору належить концепція статті, аналіз та обробка експериментальних даних.

6. Zalozh V. Acoustic method for estimation of marine low-speed engine turbocharger parameters / R. Varbanets, O. Fomin, V. Pištěk, V. Klymenko, D. Minchev, A. Khrulev, V. Zalozh, P. Kučera // Journal of Marine Science and Engineering. – 2021. – Vol. 9(3):321. – P. 1-13. – DOI: <https://doi.org/10.3390/jmse9030321>. (*Scopus Q2*). Автору належить постановка завдання, аналіз експериментальних даних, обробка результатів спектрального аналізу та розробка методу діагностування.

Перелік статей у виданнях, включених до Переліку наукових фахових видань України та у наукових періодичних виданнях інших держав

7. Залож В. І. Аналіз циклової нерівномірності для суднових дизельних двигунів в режимі реального часу / В. І. Залож, Р. А. Варбанець, Д. С. Мінчев // Водний транспорт. Збірник наукових праць Державного університету інфраструктури та технологій. – 2025. – Вип. 1 (42). – С. 37-45. – DOI: <https://doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.06>. Автором виконана розробка методу та аналіз циклової нерівномірності для суднових дизельних двигунів в режимі реального часу в умовах експлуатації.

8. Залож В. І. Аналітичний метод визначення верхньої мертвої точки поршня для системи параметричної діагностики суднових дизелів / Р. А. Варбанець, Д. С. Мінчев, В. І. Залож // Розвиток транспорту. – 2024. – Вип. №3(22). – С. 41-59. – DOI: <https://doi.org/10.33082/td.2024.3-22.04>. Автором здійснено розробку методу аналітичного визначення верхньої мертвої точки поршня для використання його в системі параметричної діагностики суднових дизелів.

9. Залож В. І. Параметрична діагностика суднових дизельних двигунів в режимі реального часу / Р. А. Варбанець, Д. С. Мінчев, Ю. М. Кучеренко, В. І. Залож // Двигуни внутрішнього згоряння. – 2024. – Вип. № 1(2024). – С. 69-75. – DOI: <https://doi.org/10.20998/0419-8719.2024.1.09>. Автору належить концепція статті, обробка експериментальних даних та розробка методів параметричної діагностики суднових дизельних двигунів в режимі реального часу.

10. Залож В. І. Огляд сучасних тенденцій розвитку систем діагностики суднових дизельних двигунів по параметрам робочого процесу / В. І. Залож // Розвиток транспорту. – 2024. – Вип. №1(20). – С. 44-56. – DOI: <https://doi.org/10.33082/td.2024.1-20.05>.

11. Залож В. І. Удосконалення моделі згоряння палива дизельного двигуна при застосуванні її в цифровому двійнику / Д. С. Мінчев, Р. А. Варбанець, В. І. Залож, М. С. Агєєв, С. П. Псарюк // Розвиток транспорту. – 2023. – Вип. №4(19). – С. 108-124. – DOI: <https://doi.org/10.33082/td.2023.4-19.09>. Автор здійснивав аналіз експериментальних даних та приймав участь у розробці висновків статті.

12. Залож В. І. Деякі питання оцінки енергоефективності суден в умовах енергетичного переходу у внутрішньому судноплавстві / П. С. Суворов, Т. В. Тарасенко, В. І. Залож // Двигуни внутрішнього згоряння. – 2023. – Вип. № 2(2023). – С. 37-45. – DOI: <https://doi.org/10.20998/0419-8719.2023.2.05>. Автор

здійснював аналіз оцінки енергоефективності суден в умовах енергетичного переходу у внутрішньому судноплаванні.

13. Залож В. І. Аналіз трансформації оцінки енергоефективності суден в умовах енергетичного переходу у внутрішньому водному транспорті / П. С. Суворов, Т. В. Тарасенко, В. І. Залож // Водний транспорт. Збірник наукових праць Державного університету інфраструктури та технологій. – 2023. – Випуск 1(37). – С. 161-170. – DOI: <https://doi.org/10.33298/2226-8553.2023.1.37.18>. Автор приймав участь у формуванні концепції збереження оцінки енергоефективності при роботі суден на альтернативних паливах в умовах енергетичного переходу.

14. Залож В. І. Діагностика паливної апаратури, приводу клапанів газорозподілу та форсунок змащення циліндрів сучасних двотактних двигунів / Р. А. Варбанець, В. П. Мальчевський, Д. С. Мінчев, В. І. Залож, В. І. Кирнац, Н. І. Александровська // Авіаційно-космічна техніка і технологія. – 2022. – Вип. № 4 спецвипуск 2 (182). – С. 92-100. – DOI: <https://doi.org/10.32620/aktt.2022.4sup2.14>. Автор приймав участь в розробці концепції статті та методів діагностики паливної апаратури, приводу клапанів газорозподілу та форсунок змащення циліндрів. Здійснював обробку експериментальних даних та розробляв висновки.

15. Залож В. І. Віброакустична діагностика турбокомпресора суднового дизельного двигуна / Р. А. Варбанець, О. В. Фомін, В. Г. Клименко, Д. С. Мінчев, В. П. Мальчевський, В. І. Залож // Розвиток транспорту. – 2022. – Вип. №1(12). – С. 30-44. – DOI: <https://doi.org/10.33082/td.2022.1-12.03>. Автор приймав участь в розробці концепції статті та методів віброакустичної діагностики турбокомпресора суднового дизельного двигуна. Здійснював обробку експериментальних даних та розробляв висновки.

16. Zalozh V. Approach of using a system of evaluation indicators in determining the efficiency of ships in the Danube shipping / T. Tarasenko, V. Zalozh, S. Maksymov // Scientific Bulletin of Naval Academy. – 2022. – Vol. XXV. – P. 66-74. – DOI: <https://doi.org/10.21279/1454-864X-22-11-008>. Автор здійснював аналіз методів оцінки енергоефективності суден.

17. Залож В. І. Деякі аспекти застосування системи DEPAS D4.0H для підвищення енергоефективності суден внутрішнього плавання / Р. А. Варбанець, В. І. Залож, Т. В. Тарасенко, В. І. Кирнац, В. Г. Клименко, Н. І. Александровська // Двигуни внутрішнього згоряння. – 2021. – Вип. № 2(2021). – С. 60-67. – DOI: <https://doi.org/10.20998/0419-8719.2021.2.08>. Автору належить концепція статті, обробка експериментальних даних та розробка методів застосування системи DEPAS D4.0H для підвищення енергоефективності суден внутрішнього плавання.

18. Залож В. І. Обмежувальні фактори в оцінці енергоефективності суден-штовхачів великовантажних составів у внутрішньому плаванні / П. С. Суворов, Т. В. Тарасенко, В. І. Залож // Автоматизація судових технічних засобів. – 2020. – Вип. 26. – С. 94-109. – DOI: <https://doi.org/10.31653/1819-3293-2020-1-26-94-109>. Автор здійснював аналіз методів оцінки енергоефективності суден-штовхачів великовантажних составів у внутрішньому плаванні та розробляв висновки.

19. Залож В. І. Діагностика турбокомпресора дизельного двигуна за допомогою аналізу віброакустичного спектру / Р. А. Варбанець, В. Г. Клименко, Д. С. Мінчев, В. І. Залож, В. І. Кирнац, Н. І. Александровська // Авіаційно-космічна

техніка і технологія. – 2020. – Вип. № 6. – С. 24-33. – DOI: <https://doi.org/10.32620/aktt.2020.6.03>. Автор приймав участь в розробці концепції статті та методів віброакустичної діагностики турбокомпресора суднового дизельного двигуна. Здійснював обробку експериментальних даних та розробляв висновки.

20. Zalozh V. Efficiency Control Improvement of Diesel Engines Conditions by Using the Method of Analytical Synchronization of Monitored Data / V. Zalozh, T. Tarasenko, R. Varbanets // *Technium: Romanian Journal of Applied Sciences and Technology*. – 2020. – Vol. 2, № 7. – P. 151-159. – DOI: <https://doi.org/10.47577/technium.v2i7.1829>. Автором здійснено розробку методу аналітичного визначення верхньої мертвої точки поршня для підвищення ефективності систем параметричної діагностики суднових дизелів.

21. Залож В. І. Особливості аналітичної синхронізації даних моніторингу робочого процесу транспортних дизелів в умовах експлуатації / Р. А. Варбанець, В. І. Залож, Т. В. Тарасенко, Ю. М. Кучеренко, В. Г. Клименко // *Двигуни внутрішнього згоряння*. – 2020. – Вип. № 1(2020). – С. 14-21. – DOI: <https://doi.org/10.20998/0419-8719.2020.1.02>. Автором здійснено розробку методу аналітичної синхронізації даних моніторингу робочого процесу транспортних дизелів в умовах експлуатації для підвищення ефективності параметричної діагностики.

22. Залож В. І. Метод аналітичної синхронізації даних моніторингу робочого процесу транспортних дизелів в експлуатації / Р. А. Варбанець, В. І. Залож, Т. В. Тарасенко, Т. П. Белоусова, О. В. Єриганов // *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. – 2020. – Вип. № 7. – С. 118-128. – DOI: <https://doi.org/10.32620/aktt.2020.7.17>. Автором здійснено розробку методу аналітичної синхронізації даних моніторингу робочого процесу транспортних дизелів для використання в системі параметричної діагностики суднових дизелів. Здійснено обробку експериментальних даних та висновки.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

23. Залож В. І. Методи діагностування суднових дизелів за параметрами робочого процесу в реальному часі / В. Залож // *XXX Міжнародний конгрес двигунобудівників : тези доповідей*. – Харків : Нац. аерокосмічний ун-т «Харк. авіац. ін-т», 2025. – С. 31–32.

24. Zalozh V. Real-time diagnostic approaches for marine diesel engines in the context of IMO decarbonization goals. / Varbanets R., Psaryuk S., Mazur T., Rodionov A., Bondarenko V., Malchevskiy V., Zalozh V. // *Modern Information and Innovation Technologies in Transport (MINTT – 2025) : proceedings of the XVII International Scientific and Practical Conference, May 28–30, 2025, Odesa*. – Odesa: Kherson State Maritime Academy, 2025. – P. 261-269. Автору належить концепція статті та розробка методу аналітичного визначення верхньої мертвої точки поршня для використання його в системі параметричної діагностики суднових дизелів.

25. Залож В. І. Параметрична діагностика суднових дизельних двигунів в режимі реального часу / Р. А. Варбанець, Д. С. Мінчев, Ю.М. Кучеренко, В. І. Залож

// Матеріали VI Міжнар. наук.-практ. морської конф. кафедри СЕУ і ТЕ Одеського національного морського університету «Marine Power Plants and Operation» (MPP&O-2025), м. Одеса, 4 березня 2025 р. – Одеса : Одеський національний морський університет, 2025. – С. 66-74. *Автором виконана розробка методів діагностики суднових дизелів в реальному часі в умовах експлуатації.*

26. Залож В. І. Діагностування суднових дизелів за параметрами робочого процесу в реальному часі / Р. А. Варбанець, Д. С. Мінчев, Ю. М. Кучеренко, В. І. Залож // XXIX Міжнародний конгрес двигунобудівників : тези доповідей. – Харків : Нац. аерокосмічний ун-т «Харк. авіац. ін-т», 2024. – С. 36-37. *Автор приймав участь у розробці методу визначення поточного значення коефіцієнта варіації зміни тиску в робочому циліндрі.*

27. Залож В. Сучасні підходи до моніторингу та діагностики морських дизельних двигунів / В. Залож // Інноваційні підходи до розвитку компетентнісних якостей фахівців в умовах професійного становлення : матеріали VIII Міжн. наук.-практ. конф., Ізмаїл, 19-20 квітня 2024 р. – Запоріжжя : АА Тандем, 2024. – С. 36-40.

28. Залож В. І. Огляд існуючих систем моніторингу суднових дизельних двигунів / В. І. Залож, Т. В. Тарасенко // Сучасні енергетичні установки на транспорті і технології та обладнання для їх обслуговування : матеріали 15-ї Міжнар. наук.-практ. конф., 13-15 березня 2024 р. – Херсон : Херсонська державна морська академія, 2024. – С. 60-63. *Автору належить концепція статті та аналіз тенденцій розвитку систем параметричного діагностування суднових дизелів.*

29. Залож В. І. Особливості оцінки енергоефективності суден у внутрішньому судноплаванні / П. С. Суворов, Т. В. Тарасенко, В. І. Залож // XXVIII Міжнародний конгрес двигунобудівників : тези доповідей. – Харків : Нац. аерокосмічний ун-т «Харк. авіац. ін-т», 2023. – С. 43-44. *Автор здійснював аналіз оцінки енергоефективності суден в умовах енергетичного переходу у внутрішньому судноплаванні.*

30. Залож В. Аналіз заходів щодо скорочення шкідливих викидів з суден / В. Залож // Інноваційні підходи до розвитку компетентнісних якостей фахівців в умовах професійного становлення : матеріали VII Міжн. наук.-практ. конф., Ізмаїл, 21-22 квітня 2023 р. – Запоріжжя : АА Тандем, 2023. – С. 155-158.

31. Залож В. І. Підхід до неруйнівної діагностики системи впорскування палива судового двигуна з використанням вібродатчиків / Р. А. Варбанець, Д. С. Мінчев, В. І. Залож, Т. В. Тарасенко, В. Г. Абросімов // Сучасні енергетичні установки на транспорті і технології та обладнання для їх обслуговування : матеріали 14-ї Міжнар. наук.-практ. конф., 16-18 березня 2023 р. – Херсон : Херсонська державна морська академія, 2023. – С. 109-113. *Автору належить постановка завдання, аналіз експериментальних даних та обробка результатів.*

32. Залож В. І. Особливості вібродіагностики суднових дизельних двигунів / Р. А. Варбанець, В. П. Мальчевський, Д. С. Мінчев, В. І. Залож, В. І. Кирнац, Н. І. Александровська // Сучасні підходи до високоефективного використання засобів транспорту : матеріали XIII Міжн. наук.-практ. конф., Ізмаїл, 8-9 грудня 2022 р. – Запоріжжя : АА Тандем, 2022. – С. 27-33. *Автор приймав участь у розробці методів вібродіагностики суднових дизельних двигунів та здійснював обробку експериментальних даних.*

33. Залож В. І. Технологія діагностики сучасних двотактних двигунів та компресорів / Р. А. Варбанець, В. П. Мальчевський, Д. С. Мінчев, В. І. Залож, В. І. Кирнац, Н. І. Александровська, К. В. Воловик // Інновації в судобудуванні та океанотехніці : матеріали XIII Міжнар. наук.-техн. конф. – Миколаїв : Видавець Торубара В. В., 2022. – С. 162-167. *Автор приймав участь у розробці методів діагностики паливної апаратури, приводу клапанів газорозподілу та форсунок змащення циліндрів. Здійснював обробку експериментальних даних та розробляв висновки.*

34. Залож В. І. Особливості застосування системи EPM-XP PLUS для діагностування технічного стану судових дизелів / В. І. Залож // Сучасні підходи до високоефективного використання засобів транспорту : матеріали XIII Міжн. наук.-практ. конф., Ізмаїл, 8-9 грудня 2022 р. – Запоріжжя : АА Тандем, 2022. – С. 161-165.

35. Залож В. І. Особливості діагностики систем сучасних двотактних двигунів / Р. А. Варбанець, В. П. Мальчевський, Д. С. Мінчев, В. І. Залож, В. І. Кирнац, Н. І. Александровська // XXVII Міжнародний конгрес двигунобудівників : тези доповідей. – Харків : Нац. аерокосмічний ун-т «Харк. авіац. ін-т», 2022. – С. 29-30. *Автор приймав участь у розробці концепції статті, здійснював обробку експериментальних даних та розробляв висновки.*

36. Zalozh V. Approach of using a system of evaluation indicators in determining the efficiency of ships in the Danube shipping / T. Tarasenko, V. Zalozh, S. Maksymov // The 8th International Scientific Conference SEA-CONF 2022, May 19-20, 2022. – Constantza, Romania, 2022. P. 19-20. *Автор здійснював аналіз методів оцінки енергоефективності суден.*

37. Залож В. І. Підвищення ефективності контролю технічного стану транспортних дизелів / В. І. Залож // Інноваційні підходи до розвитку компетентнісних якостей фахівців в умовах професійного становлення : матеріали VI міжнар. наук.-практ. конф., Ізмаїл, 21 квітня 2022 р. – Запоріжжя : АА Тандем, 2022. – С. 55-58.

38. Залож В. І. Аналітичні способи визначення положення верхньої мертвої точки поршня / Р. А. Варбанець, В. І. Залож, Т. В. Тарасенко, О. А. Россомаха // MPP&O-2022 (Marine Power Plants and Operation) : матеріали IV Міжнар. наук.-практ. морської конф. кафедри СЕУ і ТЕ Одеського національного морського університету, 18-21 квітня 2022 р. – Харків : Видавництво Іванченка І. С., 2022. – С. 57-67. *Автором здійснено розробку аналітичних способів визначення положення верхньої мертвої точки поршня для систем параметричної діагностики.*

39. Залож В. І. Застосування результатів діагностування головних дизелів для обґрунтування оптимальних режимів експлуатації / Р. А. Варбанець, В. І. Залож, Т. В. Тарасенко // Суднова енергетика: стан та проблеми : матеріали X Міжнар. наук.-техн. конф., 4–5 листопада 2021 р. – Миколаїв : Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, 2021. – С. 103-107. *Автор здійснював аналіз результатів діагностування головних дизелів та розробку рекомендацій щодо оптимальних режимів експлуатації.*

40. Залож В. І. Деякі тенденції розгляду перспектив розвитку внутрішнього водного транспорту у контексті його енергоефективності / Т. В. Тарасенко, В. І. Залож // Прогресивні технології засобів транспорту : матеріали першої міжнар.

наук.-техн. конф., 23-24 вересня 2021 р. – Харків-Миргород : УкрДУЗТ, 2021. – С. 166-167. *Автор здійснивав аналіз оцінки енергоефективності внутрішнього водного транспорту та приймав участь у розробці висновків статті.*

41. Залож В. І. Підвищення енергоефективності суден внутрішнього плавання із застосуванням системи DEPAS D4.0H / Р. А. Варбанець, В. І. Залож, Т. В. Тарасенко // Сучасні енергетичні установки на транспорті і технології та обладнання для їх обслуговування : матеріали 12-ї Міжнар. наук.-практ. конф., 06-08 вересня 2021 р. – Херсон : Херсонська державна морська академія, 2021. – С. 33-37. *Автор приймав участь у формуванні концепції застосування системи DEPAS D4.0H для підвищення енергоефективності суден внутрішнього плавання.*

42. Залож В. І. Застосування системи DEPAS D4.0H з метою підвищення енергоефективності суден внутрішнього плавання / Р. А. Варбанець, В. І. Залож, Т. В. Тарасенко, В. І. Кирнац, В. Г. Клименко, Н. І. Александровська // XXVI міжнародний конгрес двигунобудівників : тези доповідей. – Харків : Нац. аерокосмічний ун-т «Харк. авіац. ін-т», 2021. – С. 52-53. *Автор приймав участь у формуванні концепції, здійснював обробку експериментальних даних та розробляв висновки.*

43. Zalozh V. The considerations regarding reducing Danube navigation emissions / T. Tarasenko, V. Zalozh, R. Varbanets, D. Minchev // 7th International Scientific Conference SEA-CONF 2021, May 21-22, 2021. – Constantza, Romania, 2021. – P. 7-8. *Автором здійснено аналіз заходів щодо зменшення викидів у дунайському судноплаванні, обробка експериментальних даних та формування висновків.*

44. Залож В. І. Особливості аналітичної синхронізації даних моніторингу робочого процесу транспортних дизелів в умовах експлуатації / Р. А. Варбанець, В. І. Залож, Ю. М. Кучеренко, В. І. Кирнац, С. І. Крайчева, В. Г. Абросімов // MPP&O-2021 (Marine Power Plants and Operation) : матеріали III Міжнар. наук.-практ. морської конф. кафедри СЕУ і ТЕ Одеського національного морського університету, квітень 2021 р. – Харків : Видавництво Іванченка І. С., 2021. – С. 11-22. *Автором розроблено метод аналітичної синхронізації даних моніторингу для транспортних дизелів в умовах експлуатації.*

45. Залож В. І. Віброакустичний аналіз турбокомпресора суднового дизельного двигуна / Р. А. Варбанець, В. Г. Клименко, В. І. Залож // Дніпровські читання-2020 : матеріали міжнар. наук.-практ. конф., м. Київ, 23 грудня 2020 р. – Київ : вид-во Київського інституту водного транспорту імені гетьмана Петра Конашевича-Сагайдачного Державного університету інфраструктури та технологій, 2020. – С. 108-111. *Автор приймав участь в розробці концепції статті та методу віброакустичної діагностики турбокомпресора суднового дизельного двигуна.*

46. Залож В. І. Діагностування технічного стану головних дизелів системою DEPAS D4.0H / Р. А. Варбанець, В. І. Залож, О. М. Кононова, В. Г. Клименко // Сучасні підходи до високоефективного використання засобів транспорту : матеріали XI Міжн. наук.-практ. конф., Ізмаїл, 3-4 грудня 2020 р. – Запоріжжя : АА ТанDEM, 2020. – С. 219-225. *Автором здійснено дослідження можливостей діагностування технічного стану головних дизелів за допомогою системи DEPAS D4.0H. Здійснював обробку експериментальних даних та розробляв висновки.*

47. Zalozh V. Efficiency control improvement of diesel engines conditions by using

the method of analytical synchronization of monitored data / V. Zalozh, T. Tarasenko, R. Varbanets // Proceedings of the 7th Technium Conference 2020, 12 October 2020, Constanta, Romania. – Vol. 2, No. 7, 2020. – P. 151-159. *Автором здійснено розробку методу аналітичного визначення верхньої мертвої точки поршня для підвищення ефективності систем параметричної діагностики суднових дизелів.*

48. Залож В. І. Рішення задачі аналітичної синхронізації даних моніторингу робочого процесу транспортних дизелів в умовах експлуатації / Р. А. Варбанець, В. І. Залож, Т. В. Тарасенко, В. Г. Абросимов, В. Г. Клименко // XXV міжнародний конгрес двигунобудівників : тези доповідей. – Харків : Нац. аерокосмічний ун-т «Харк. авіац. ін-т», 2020. – С. 38-40. *Автором здійснено розробку методу аналітичної синхронізації даних моніторингу робочого процесу транспортних дизелів в умовах експлуатації для підвищення ефективності параметричної діагностики.*

49. Залож В. І. Аналітична синхронізація даних моніторингу робочого процесу транспортних дизелів в умовах експлуатації / Р. А. Варбанець, В. І. Залож, Т. В. Тарасенко, В. Г. Абросимов, В. Г. Клименко, О. І. Ваганов // Сучасні енергетичні установки на транспорті і технології та обладнання для їх обслуговування : матеріали 11-ї Міжнар. наук.-практ. конф., 08-10 вересня 2020 р. – Херсон : Херсонська державна морська академія, 2020. – С. 40-42. *Автором здійснено розробку методу аналітичної синхронізації даних моніторингу робочого процесу транспортних дизелів для використання в системі параметричної діагностики суднових дизелів. Здійснено обробку експериментальних даних та висновки.*

АНОТАЦІЯ

Залож В. І. *Методологія діагностування суднових дизелів за параметрами робочого процесу в реальному часі. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.*

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.05.03 «Двигуни та енергетичні установки». – Одеський національний морський університет, Одеса, 2026.

Дисертація присвячена розв'язанню важливої науково-прикладної проблеми 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. Розроблені в дисертації методи дозволяють підвищити ефективність експлуатації суднових дизельних двигунів, створити портативні діагностичні системи нового покоління та, спираючись на експериментальні дані реального часу, отримувати вичерпну діагностичну інформацію щодо поточного стану двигуна та ефективності функціонування критично важливих систем: паливоподачі, газообміну та циліндропоршневої групи на різних режимах експлуатації.

У результаті виконаних наукових досліджень розроблено методи діагностування суднових дизелів, які дають змогу оцінювати варіативність якості згоряння палива, фаз подачі палива та газорозподілу у послідовних робочих циклах. Розроблені методи дають можливість регулювати двигун та аналізувати результати налаштування систем, що відповідають за якість згоряння палива, безпосередньо під час експлуатації, що підвищує ефективність діагностичного контролю та сприяє зниженню загального рівня вібрації, збільшенню безаварійного періоду експлуатації та зниженню витрати палива.

Наукове та практичне значення роботи полягає в розробці методів та алгоритмів функціонування нового покоління систем параметричної діагностики суднових дизелів в режимі реального часу. Розроблені в дисертації методи дозволяють створити портативні діагностичні системи нового покоління та підвищити ефективність експлуатації суднових дизелів, отримуючи інформацію щодо якості робочого процесу у циліндрах та вичерпну інформацію щодо ефективності функціонування критично важливих систем: паливоподачі, газообміну та циліндропошневої групи на різних режимах експлуатації.

Ключові слова: суднові дизельні двигуни, циклова варіативність, коефіцієнт варіації, індекс нерегулярності циклу, параметрична діагностика, паливоподача, газорозподіл, вібродіагностика, діагностування в реальному часі, синхронізація даних, верхня мертва точка, робочий процес двигуна, портативні діагностичні системи.

ABSTRACT

Zalozh V. I. Methodology for Diagnosing Marine Diesel Engines Based on Working Process Parameters in Real Time. – Qualifying scientific manuscript.

Dissertation for a Doctoral Degree in Technical Sciences, specialty 05.05.03 “Engines and Power Plants”. – Odesa National Maritime University, Odesa, 2026.

This dissertation solves an important scientific and applied problem of establishing theoretical and methodological foundations for a fundamentally new portable diagnostic system for marine diesel engines that provides diagnostics based on working process parameters in real time and integrates into modern digital systems. The methods developed in the dissertation allow for improving the operational efficiency of marine diesel engines, creating next-generation portable diagnostic systems, and obtaining comprehensive diagnostic information about the current engine condition and the operational efficiency of critical systems based on real-time experimental data: fuel injection, gas exchange, and cylinder-piston assembly under various operating conditions.

As a result of the conducted scientific research, methods for diagnosing marine diesel engines have been developed that allow for evaluating the variability of fuel combustion quality, fuel injection phases, and gas distribution in consecutive working cycles. The developed methods enable engine adjustment and analysis of system tuning results responsible for fuel combustion quality directly during operation, which improves diagnostic control efficiency and contributes to reducing overall vibration levels, increasing failure-free operation periods, and reducing fuel consumption.

The scientific and practical significance of the work lies in developing methods and algorithms for the functioning of a new generation of parametric diagnostic systems for marine diesel engines in real-time mode. The methods developed in the dissertation allow for creating next-generation portable diagnostic systems and improving the operational efficiency of marine diesel engines by obtaining information about the quality of working processes in cylinders and comprehensive information about the operational efficiency of critical systems: fuel injection, gas exchange, and cylinder-piston assembly under various operating conditions.

Keywords: marine diesel engines, cycle-to-cycle variability, coefficient of variation, cycle irregularity index, parametric diagnostics, fuel injection, gas distribution, vibration diagnostics, real-time diagnostics, data synchronization, top dead center, engine working process, portable diagnostic systems.

Підписано до друку 22.01.2026 формат 60x84/16. Папір офсет
Гарнітура Times New Roman. Ум. друк. арк. 1,9
Наклад 100 прим. Зам № 901

Надруковано цифровою друкарнею Copy Art
Україна. м. Запоріжжя пр. Соборний 166
095-908-28-56
copyart.com.ua