

МОРСЬКИЙ ТА ВНУТРІШНІЙ ВОДНИЙ ТРАНСПОРТ

УДК 621.436:629.128.6

DOI <https://doi.org/10.33082/td.2024.1-20.05>

ОГЛЯД СУЧАСНИХ ТЕНДЕНЦІЙ РОЗВИТКУ СИСТЕМ ДІАГНОСТИКИ СУДНОВИХ ДИЗЕЛЬНИХ ДВИГУНІВ ПО ПАРАМЕТРАМ РОБОЧОГО ПРОЦЕСУ

В.І. Залож

к.т.н., доцент, доцент кафедри інженерних дисциплін,
Дунайський інститут Національного університету «Одеська морська академія»,
Ізмаїл, Україна,
ORCID ID: 0000-0002-5213-6896

Анотація

Вступ. У роботі розглядаються сучасні виклики та розвиток систем діагностики суднових дизельних двигунів за параметрами робочого процесу в морській індустрії. У контексті зростання вимог до ефективності, надійності та безпеки суднових дизельних двигунів акцентується увага на необхідності впровадження передових 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. **Метою роботи** є огляд наявних систем діагностики дизелів за параметрами робочого процесу в морській індустрії, аналіз їх переваг та недоліків, а також визначення основних напрямів удосконалення в цій галузі, адже діагностика та подальше вдосконалення характеристик робочого процесу двигуна є одним із варіантів вирішення ефективності силової установки, що виступає основою для забезпечення надійності та довговічності обладнання. На основі аналізу індикаторних діаграм тиску газів у робочих циліндрах здійснюється вибір оптимального навантажувального режиму експлуатації та діагностика двигуна. Цей підхід дозволяє точно визначити параметри робочого процесу та виявити будь-які аномалії, що можуть призвести до неполадок. Це сприяє підвищенню ефективності використання палива, зниженню шкідливих викидів у навколишнє середовище та продовженню терміну служби суднових двигунів. **Аналізуючи** як історичні, так і сучасні системи діагностики суднових дизелів за параметрами робочого процесу, автор охоплює широкий спектр підходів до параметричної діагностики та оптимізації робочого процесу дизелів. Завдяки високій точності та актуальності отриманої інформації системи реального часу сприяють ефективній діагностиці робочого процесу та управлінню станом двигуна під час експлуатації. Також розглядаються та порівнюються деякі стаціонарні системи діагностики дизелів за параметрами робочого процесу, які є ефективними, але мають свої обмеження. **Таким чином**, незважаючи на широке застосування стаціонарних систем діагностики реального

часу, нагальною залишається потреба у створенні мобільних систем, здатних оперативно функціонувати. Відсутність таких інноваційних рішень підкреслює потенціал для майбутніх наукових досліджень у цьому напрямі.

Ключові слова: судновий дизельний двигун, параметрична діагностика, моніторинг робочого процесу, верхня мертва точка, індикаторна потужність, системи діагностики реального часу, портативні пристрої.

OVERVIEW OF MODERN TRENDS IN THE DEVELOPMENT OF MARINE DIESEL ENGINE PERFORMANCE DIAGNOSTIC SYSTEMS

V.I. Zalozh

PhD, associated prof. of the Department “Engineering Sciences”
Danube Institute of National University “Odessa Maritime Academy”, Izmail, Ukraine,
ORCID ID: 0000-0002-5213-6896

Summary

Introduction. This paper explores the contemporary challenges and advancements in the performance diagnostic systems based on working process parameters of marine diesel internal combustion engines. Amid increasing demands for efficiency, reliability, and safety in maritime diesel engines, the necessity of implementing advanced performance diagnostic technologies, especially those functioning in real-time, is emphasized. These systems enable the rapid identification of operational parameter changes in diesel engines, allowing operators to quickly detect and address potential malfunctions. **The aim** of this study is to examine the existing performance diagnostic systems based on working process parameters for marine diesel internal combustion engines, to analyze their advancements and limitations, and to identify key directions for their improvement. Indeed, diagnosing and refining the working process characteristics of an engine represents a strategy to enhance the efficiency of diesel engines, laying the groundwork for the equipment's reliability and longevity. Through the analysis of indicator diagrams of gas pressure in the working cylinders, optimal operating load modes and engine diagnostics are determined. This approach provides a precise evaluation of the working process parameters and the identification of any anomalies that could lead to malfunctions. **As a result**, it contributes to improved fuel efficiency, reduced emissions harmful to the environment, and prolonged service life of marine engines. The article reviews both historical and contemporary performance diagnostic systems, presenting various approaches to the parametric diagnostics and optimization of diesel engines' working processes. Owing to the high accuracy and timeliness of the data obtained, real-time systems ensure effective monitoring and management of the engine's condition during operation. The paper also examines and contrasts some stationary performance diagnostic systems which, despite their effectiveness, exhibit certain limitations. **In conclusion**, despite the prevalent use of stationary real-time performance monitoring systems, there exists an urgent need for the development of mobile systems capable of operating efficiently and swiftly. The absence of such innovative solutions highlights the potential for future scientific research in this area.

Key words: marine diesel, parametric diagnostics, monitoring working process, top dead center, indicated power, real-time performance diagnostic systems, portable devices.

Вступ. Сучасна морська індустрія стоїть перед постійними викликами, пов'язаними з підвищенням ефективності, надійності та безпеки суднових дизельних двигунів. В умовах стрімкого технологічного розвитку стає обов'язковим впровадження новітніх засобів моніторингу, аналізу та діагностики дизельних двигунів за параметрами робочого процесу для забезпечення найвищого рівня функціональності та попередження можливих неполадок. Підвищення ефективності контролю технічного стану суднових дизелів є ключовим завданням у сфері їхньої експлуатації.

Ефективний моніторинг робочого процесу виступає основою для забезпечення надійності та довговічності обладнання. Вибір оптимального навантажувального режиму експлуатації та діагностика двигуна за параметрами робочого процесу здійснюються на основі аналізу індикаторних діаграм тиску газів у робочих циліндрах. Це дозволяє точно визначити параметри робочого процесу та виявити будь-які аномалії, що можуть призвести до неполадок. Одним із ключових етапів діагностики робочого процесу є розрахунок індикаторної потужності, яка визначає навантажувальний режим та служить основою для оцінки енергоефективності [1]. Цей розрахунок також ґрунтується на аналізі індикаторних діаграм, що дозволяє здійснювати точні виміри та контрольовану оцінку роботи дизельного двигуна в реальному часі. Такий підхід сприяє оптимізації робочого процесу, зменшенню ризиків поломок та підвищенню загальної продуктивності морського транспорту. Завдяки ефективному управлінню технічним станом суднових дизелів досягається баланс між ефективністю та надійністю їхньої експлуатації.

Актуальність. Розвиток систем діагностики суднових дизелів за параметрами робочого процесу тісно пов'язаний із загальними тенденціями у галузі Інтернету речей (*IoT*) та великих даних (*Big Data*). Використання сучасних датчиків, мікропроцесорів та алгоритмів обробки даних дозволяє отримувати величезні обсяги інформації про роботу двигуна в реальному часі та здійснювати її глибокий аналіз. Це сприяє підвищенню ефективності використання палива, зниженню шкідливих викидів у навколишнє середовище та продовженню терміну служби суднових двигунів.

Мета досліджень – огляд наявних систем діагностики суднових дизелів за параметрами робочого процесу, включаючи аналіз їх переваг та недоліків, а також визначення основних напрямів удосконалення в цій галузі.

Результати досліджень. Одна з перших, широко поширених в 1990-х рр. на флоті систем діагностики морських дизелів, а наразі вже історична – це *NK-5* і подальші *NK-100*, *NK-200* норвезької фірми *Autronica A/S*. Сучасні європейські системи – це *CMT Premet® X*, *IMES EPM-XP^{plus-vibro}*, *DEPAS D4.0H*, *Leutert DPI 50*, *MAN B&W PMI*, *Kistler (CLCC, Offline)*, *Maridis MarPrime Ultra*, *Lemag ECI*.

А також існує багато інших систем, розроблених ще до початку 2000-х років, а саме: *Premet XL*, *Dimar-Tec PTE*, *ABB Cyldet*, *Кума KDA*, *Drew Marine*, *Tx Marine*, *Digitec Diesel Tune III*, *Depas 2.0*, *Malin*, *Unitest 205* (див. табл. 1) [2–14; 19].

На сучасному етапі розвитку морського транспорту з'являється все більше систем діагностики робочого процесу суднових дизелів, які можна класифікувати на стаціонарні та портативні (переносні) системи. Стаціонарні системи діагностики становлять єдиний програмно-апаратний комплекс. Вони працюють у режимі

реального часу, забезпечуючи запис параметрів роботи двигунів та їх аналіз. Така швидка реакція на зміни дозволяє операторам негайно виявляти потенційні несправності та вживати відповідних заходів, знижуючи ризик виникнення аварійних ситуацій.

Стационарні системи діагностики робочого процесу є ефективними але вони мають низку обмежень. Вони потребують встановлення довгих кабельних ліній, що може знижувати загальну надійність системи через потенційні поломки додаткового обладнання. Крім того, висока вартість цих систем зумовлена необхідністю використання не тільки датчиків і первинних перетворювачів, але й усього проміжного обладнання. Важливим аспектом у розвитку стаціонарних систем діагностики робочого процесу є їх спеціалізація на конкретних марках дизельних двигунів. Більшість виробників дизельних двигунів фокусується на діагностиці параметрів робочого процесу лише власних моделей, тому універсальні системи, які б підходили для двигунів різних виробників, наразі перебувають на стадії розвитку.

З іншого боку, портативні системи діагностики робочого процесу, що характеризуються своєю мобільністю, пропонують більш гнучкі можливості для збору та аналізу даних. Вони використовуються для відкладеної діагностики робочого процесу, коли дані збираються в реальному часі, а аналіз проводиться пізніше. Це дозволяє проводити більш глибокий аналіз та робити виведення зі збірки даних, зібраної протягом певного періоду.

Таблиця 1

Класифікація наявних систем діагностики робочого процесу суднових дизельних двигунів

Системи діагностики робочого процесу суднових дизельних двигунів					
Стационарні		Портативні			
Реального часу (онлайн)	Відкладеної діагностики (офлайн)	Реального часу (онлайн)	Відкладеної діагностики (офлайн)		
MAN B&W PMI (Autotuning, Adaptive Cylinder Control)	MAN B&W PMI Offline	CMT Premet® X	IMES EPM-XP ^{plus-vibro}		
			CMT Premet® M		
			DEPAS D4.0H		
Icon Research DK-200 (Doctor Analysis)	Autronica A/S NK-5, NK-100, NK-200			Icon Research DK-20	
			MAN PMI VIT		
Kistler CLCC (Closed-Loop Combustion Control)				Maridis MarPrime Ultra	
PREMET Online				Lemag ECI, Premet XL, C	
ABB Cylmate					Kistler Offline Type 2516B12
					Leutert DPI 50
					DocPad 1/2 e-600 e-line
					Кума KDA
					ABB Cyldet
				Digitec Diesel Tune III	
				Dimar-Tec PTE	
				Tx Marine PMI mkII	
		Unitest 205			
			Drew marine DPA-EZ		

Нині портативних систем, які б працювали в режимі реального часу та надавали б негайні рекомендації під час індиціювання, не так багато. Проте цей напрям вважається дуже перспективним, особливо з урахуванням швидкого розвитку технологій штучного інтелекту, цифрових двійників та потужних методів математичного моделювання [15].

Про перші спроби в цьому напрямі заявляє компанія *CMT* у своїй портативній онлайн-системі *Premet® X* типу *DPA-CT-12020* (див. рис. 1) [19].



а) онлайн-система
Premet® X типу *DPA-CT-12020*

б) офлайн-система
Premet® M типу
DPA-CT-12021

в) опціональний
вібродатчик тільки
для системи *Premet® X*

Рис. 1. Портативні системи діагностики робочого процесу
компанії *CM Technologies GmbH*:

а) реального часу; б) відкладеної діагностики; в) опціональний вібродатчик [19]

Система, виготовлена у Німеччині, використовує найновіший датчик тиску *Piezosmart* від *Kistler* у базовій версії та опціонально вібродатчик. Вібродатчик являє собою п'єзоелектричний пристрій, оснащений інтегрованим підсилювачем та блоком формування сигналу. Він виявляє акустичні хвилі у діапазоні від 300 до 700 кГц, що генеруються такими процесами, як впорскування палива через форсунку, закриття вихлопного клапану, удар голки форсунки, а також процеси відсічки у паливному насосі.

Система адаптована до роботи з двигунами різної потужності – від низькообертових до високообертових, сприяючи оптимізації впорскування палива для зниження паливної витрати та мінімізації ризиків пошкоджень і ремонтних робіт.

Портативний елемент системи являє собою високопродуктивний сенсорний комп'ютер, який у комплекті з програмним забезпеченням *Premet® Viewer* забезпечує ефективну діагностику робочого процесу та високу точність вимірювань під час роботи в різноманітних умовах експлуатації.

Портативні (переносні) системи діагностики робочого процесу представляють собою компактні та легкі пристрої, спроектовані для вимірювання, збору даних і контролю параметрів у режимі відкладеної діагностики. Відкладена діагностика робочого процесу означає систему збору та аналізу даних, що здійснюється з затримкою в часі. Тобто інформація збирається в реальному часі, але аналіз та висновки можуть бути проведені пізніше.

Системи діагностики реального часу надають негайну реакцію на будь-які зміни в параметрах роботи суднового дизельного двигуна, дозволяючи механікам швидко виявляти можливі проблеми. Дані, отримані у реальному часі, відзначаються високою точністю і актуальністю, що сприяє ефективному контролю та управлінню станом двигуна в реальних умовах експлуатації. Оператори можуть миттєво взаємодіяти з системами діагностики робочого процесу, вносячи корективи у роботу двигуна чи вживаючи невідкладних заходів у разі виявлення проблем.

Індикаторні діаграми записуються на працюючому під навантаженням двигуні за допомогою спеціальних датчиків тиску. Ці датчики мають забезпечувати стабільність характеристик навіть за високої температури вимірюваного середовища, що критично важливо для точності вимірювань. Наприклад, датчики *IMES*, *Kistler*, *ABB* широко використовуються в цій галузі завдяки їх високій точності та надійності у вимірюваннях за високих температур [2; 11].

У стаціонарних системах діагностики робочого процесу, які є невід'ємною частиною сучасних суднових дизельних двигунів, датчики тиску газів встановлюються на всіх циліндрах. Це забезпечує повноцінний і неперервний контроль за станом кожного циліндра двигуна. Завод-виробник за замовчуванням інтегрує ці датчики в двигуни, що гарантує високу точність вимірювань та оптимізацію роботи системи. Стаціонарні системи діагностики робочого процесу забезпечують постійний збір даних, що є ключовим для точного моніторингу та аналізу робочих характеристик двигуна. Застосування таких датчиків дозволяє отримувати детальну інформацію про внутрішні процеси в двигуні, включаючи робочі параметри та положення поршня. Ця інформація є невід'ємною частиною для здійснення точної діагностики стану двигуна, а також для планування профілактичного обслуговування та ремонту.

У контрасті зі стаціонарними системами портативні системи діагностики робочого процесу зазвичай комплектуються одним датчиком тиску, який може бути почергово встановлений на індикаторний кран відповідного циліндра за допомогою *Thomson adapter*. Залежно від типу система додатково може бути обладнана магнітним вібродатчиком (система *IMES EPM-XP plus-vibro*, *DEPAS D4.0H*, *CMT Premet® X*) для контролю роботи паливної апаратури високого тиску, впускних/випускних клапанів та давати цінну інформацію про технічний стан основних вузлів, таймінг паливоподачі та таймінг газорозподілу двигунів [2; 3].

Такий підхід дозволяє здійснювати гнучкі вимірювання тиску в різних циліндрах без потреби в постійній інтеграції датчиків у двигун. Це особливо важливо для діагностики робочого процесу та обслуговування двигунів, які не оснащені стаціонарними системами. Портативні системи надають операторам можливість проводити точні та цілеспрямовані перевірки стану двигуна в будь-який час та в будь-якому місці. Крім того, вбудовані в стаціонарних системах датчики тиску необхідно періодично калібрувати портативною системою.

У сучасних системах діагностики робочого процесу суднових дизелів значення тиску фіксуються у вигляді часових рядів $P(t)$, де дані записуються з постійними проміжками часу. Зазвичай крок дискретизації обирається так, щоб за один градус повороту колінчастого валу можна було отримати принаймні дві точки вимірювань. Це забезпечує достатню точність для аналізу робочого циклу двигуна.

Перетворення часових рядів $P(t)$ на індикаторні діаграми полягає у перекладі даних із функцій часу до функцій кута повороту колінчастого валу. Тут особливо увагу приділяють точності визначення верхньої мертвої точки (далі – ВМТ) поршня,

оскільки вона має ключове значення для аналізу робочих характеристик двигуна [16]. Існує два основних рішення – апаратне та аналітичне. Апаратний метод включає використання датчиків, розміщених на маховику двигуна, які дозволяють точно визначити положення колінчастого валу. Аналітичний метод передбачає аналіз діаграми тиску газів у циліндрі та її похідних, що дозволяє визначити ВМТ з високою точністю, навіть без безпосереднього використання додаткових датчиків.

Розглянемо декілька прикладів систем діагностики робочого процесу суднових дизельних двигунів.

Серед різних аналітичних методів на особливу увагу заслуговує система моніторингу робочого процесу *The Electronic Indicator Lemag "Premet XL, C"* [17], яка була однією з перших у використанні аналітичних методів для корекції ВМТ на практиці. Ця система використовує комплексний підхід до аналізу робочих характеристик двигуна, забезпечуючи високу точність та надійність діагностики.

У системі передбачено напівавтоматичну (за участю оператора) побудову дотичної до кривої швидкості зміни тиску в циліндрі на ділянці до ВМТ. Координата перетину цієї дотичної нуля (за шкалою $dp/d\phi$) припускається уточненим значенням ВМТ. Пропонується змістити всю індикаторну діаграму (скорегувати положення ВМТ) так, щоб ця дотична перетнула «0» в позиції ВМТ. Мається на увазі той факт, що за відсутності подачі палива (процес стиснення-розширення в циліндрі без згоряння) швидкість зміни тиску в ВМТ повинна дорівнювати нулю. Цей вираз не зовсім коректний, тому що існує термодинамічний зсув діаграми тиску за рахунок передачі теплоти в стінки циліндра. За рахунок термодинамічного зсуву вся діаграма тиску трохи зміщується вліво, максимум стиснення знаходиться до ВМТ і, відповідно, крива $dp/d\phi$ теж перетинає «0» трохи лівіше реального значення ВМТ. Цей факт можна врахувати за рахунок постійної корекції ВМТ, тому що термодинамічний зсув є вельми малим і для більшості морських двигунів його величина не перевищує 1 ПКВ [18].

Неврахування термодинамічного зсуву реальних індикаторних діаграм тиску в робочому циліндрі більшістю сучасних систем моніторингу робочого процесу суднових дизелів можна пояснити такими суб'єктивними причинами:

- термодинамічний зсув малий (менше 1° ПКВ), його розрахунок може бути проведений тільки при емпіричному завданні коефіцієнтів теплообміну. Розрахунок цих коефіцієнтів за різними методиками дає результати, що відрізняються майже на 100% [15; 16];

- неврахування термодинамічного зсуву діаграми вліво до ВМТ дає ефект штучного збільшення середнього індикаторного тиску й індикаторної потужності, що, безумовно, подобається механікам, які експлуатують двигун, які розраховують питомі показники двигунів для регулярних звітів.

Проте майже всі сучасні системи діагностики робочого процесу суднових дизелів мають можливість вводити постійні коефіцієнти для корекції ВМТ, що дає можливість враховувати як термодинамічний зсув, так і систематичні похибки розрахунку.

Компанія *Icon Research* представляє одразу два варіанти – стаціонарну систему реального часу *DK-200* і портативну *DK-20* [13]. Для обох систем застосовується програмне забезпечення *Doctor Analysis* версії 6.4. Необхідно виділити інтерфейс програми, який вирізняється яскравим, інтуїтивно зрозумілим дизайном з легкою навігацією та динамічною візуалізацією, високою роздільною здатністю 0,1° ПКВ, що дозволяє користувачам легко аналізувати складні набори даних. Окрему вагу

слід приділити функціоналу програмного забезпечення, який може автоматично встановити попередній діагноз, порівняти основні параметри роботи двигуна з результатами, отриманими під час заводських або морських випробувань. Додатково програма надає гвинтову характеристику, на якій представлено відсоток максимальної експлуатаційної потужності (MCR) у відношенні до обертів, і відображає робочий режим двигуна.



а) DK-200

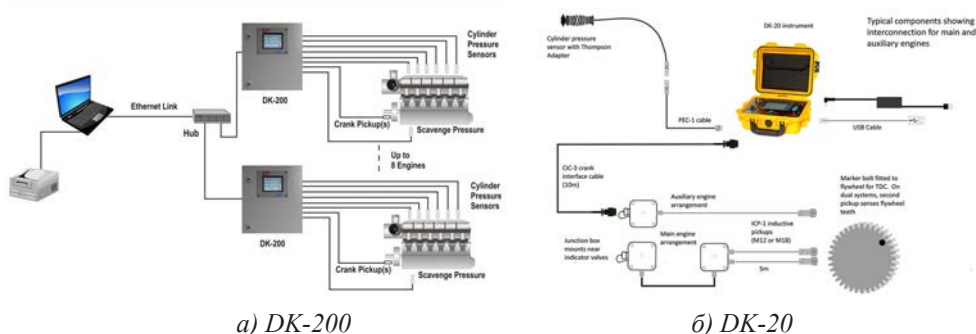
б) DK-20

в) Doctor Analysis

Рис. 2. Зовнішній вигляд стаціонарної (а), портативної (б) системи моніторингу робочого процесу від Icon Research та інтерфейсу програми Doctor Analysis (в)

Визначення положення верхньої мертвої точки здійснюється за допомогою спеціалізованих датчиків, розташованих на маховику, і в подальшому корегується за необхідності в програмному забезпеченні.

З практичної точки зору зупинка постійно працюючих суднових двигунів для монтажу датчиків, включаючи індуктивні сенсори на маховику та тиск палива, є складним завданням. Зміна режиму роботи двигуна також становить труднощі через вимоги безпеки мореплавства. Крім того, морські умови, що непередбачувано змінюються, та постійна зміна навантаження, частоти обертання двигунів вимагають застосування квазістаціонарного режиму для точної діагностики робочого процесу та визначення потужності, що ускладнено змінними хвильовими та вітровими умовами. Отже, вимірювання на двигунах мають бути виконані максимально швидко й оперативно.



а) DK-200

б) DK-20

Рис. 3. Схема зовнішніх з'єднань стаціонарної (а) та портативної (б) системи діагностики робочого процесу від Icon Research [13]

Технічні специфікації системи підкреслюють, що точне налаштування ВМТ

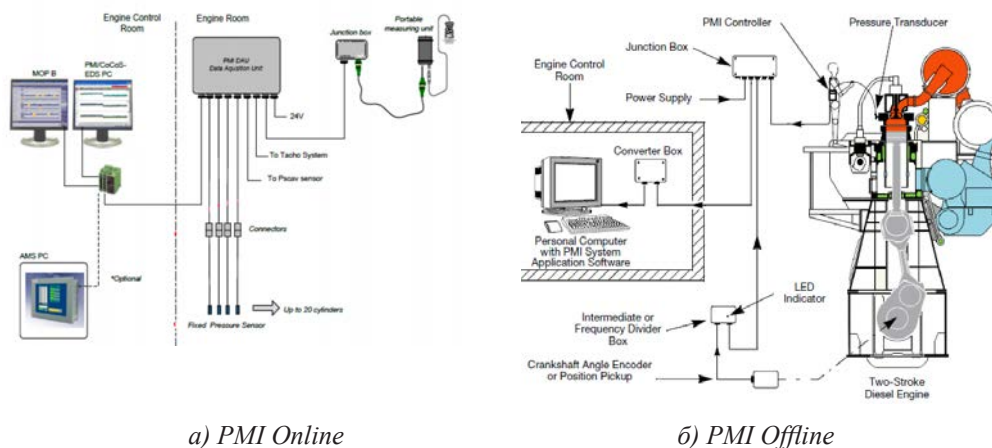
має вирішальне значення. Неправильне визначення ВМТ може спричинити помилки у вимірюванні потужності. Варто звернути увагу на те, що *Icon Research* пропонує налаштування ВМТ. Для отримання цієї послуги необхідно надіслати лог-файли моніторингових тестів на електронну пошту компанії.

Всесвітньо відома компанія *MAN B&W* надає готові рішення для своїх двигунів серії ME з електронним управлінням у вигляді стаціонарних систем діагностики робочого процесу *PMI (VIT, Autotuning, Adaptive Cylinder Control, Offline)* [5]. Системи функціонують за єдиним принципом: модуль діагностики через сенсор, встановлений на кожному циліндрі, вимірює тиск у циліндрах, а зібрана інформація про тиск використовується для автоматизованого балансування та регулювання роботи двигуна. Існує дві версії систем – офлайн і онлайн.



Рис. 4. Портативні пристрої *PMI Controller*

Онлайн-версія системи (рис. 5 а), використовує набір датчиків тиску, які стаціонарно вмонтовані на кожному циліндрі двигуна. Усі виміри відображаються в реальному часі на ПК в приміщенні ЦПУ. Цей комп'ютер називається *PMI PC*.



а) *PMI Online*

б) *PMI Offline*

Рис. 5. Структура онлайн- (а) та офлайн- (б) версій систем діагностики *PMI* від *MAN B&W* [5]

У офлайн-версії (рис. 5 б) використовується п'єзоелектричний перетворювач, який приєднується до портативного пристрою під назвою *PMI Controller* (див. рис. 4). Цей пристрій підключається до розподільної коробки біля двигуна.

Центральний елемент системи діагностики двигуна (*EMS MOP*) представлений головною операційною панеллю, яка оснащена програмами *PMI* та *CoCoS-EDS*. Ці програмні рішення розроблені для деталізованого реєстрування, відстеження та аналітичного оцінювання процесів згоряння. Використання даного інтерфейсу дозволяє операторам не лише спостерігати за актуальним станом роботи двигуна, а й проводити глибокий аналіз робочих циклів згоряння та змін основних параметрів робочого процесу двигуна. Такий підхід сприяє точній діагностиці робочого процесу та ідентифікації потенційних проблем. Система *PMI* показує автоматичний розрахунок ефективної потужності, середнього індикаторного тиску P_p , тиску стиснення P_{comp} , максимального тиску згоряння P_{max} та відношення тиску стиснення до тиску наддуву P_{comp}/P_{scav} . Також надається графічне представлення діаграм *PT*, *PV* та балансування, розраховуються пропозиції щодо коригування індексу паливного насоса (див. рис. 6).

Датчики тиску передають дані до системи *PMI*, далі до *CoCoS-EDS*, що дозволяє екіпажу проаналізувати отримані дані та визначити, чи потрібні корекції для покращення робочих параметрів двигуна на інтерфейсі *MOP*.

Визначення положення колінчастого валу та ВМТ здійснюється за допомогою спеціалізованих кутових датчиків – енкодерів. Фізично вони являють собою герметизований блок, який встановлено до вільного кінця колінчастого валу за допомогою спеціальної гнучкої муфти.

Цей блок містить диск з оптичним кодуванням, який приводиться в дію ззовні, встановлений між внутрішнім джерелом світла та детектором. Він виробляє послідовність електричних імпульсів за оберт, які використовуються для виявлення абсолютного положення колінчастого валу.



Рис. 6. Інтерфейси програми системи діагностики робочого процесу *PMI*

Використання стаціонарних та портативних типів систем відображає гнучкість сучасних методів діагностики робочого процесу суднових дизелів. Стаціонарні системи забезпечують неперервну діагностику робочого процесу, тоді як портативні системи пропонують переваги мобільності та зручності для точкових перевірок. Обидва підходи мають свої переваги та недоліки, але разом вони забезпечують комплексне рішення для ефективної діагностики робочого процесу суднових дизелів, збільшуючи ефективність їх роботи та надійність.

Висновки. Таким чином, існує потреба у створенні портативних систем діагностики суднових дизелів за параметрами робочого процесу нового покоління. Ці системи мають забезпечити низку переваг порівняно з наявними системами, серед яких слід виділити можливість роботи в режимі реального

часу, тобто змогу отримувати інформацію щодо протікання робочого процесу у циліндрах двигуна й оцінювати параметри цих процесів безпосередньо під час роботи двигуна. Такий підхід дозволяє як здійснювати регулювання двигуна під час його роботи, так і визначати специфічні несправності, пов'язані з нерівномірністю робочих циклів двигуна. Для створення таких систем необхідно вирішити важливі наукові та практичні проблеми та задачі, серед яких основними є такі:

- розробити специфічні методи діагностування двигуна за параметрами робочого процесу в режимі реального часу, які дозволять отримати додаткову важливу інформацію порівняно з наявними системами;
- визначити способи оцінки циклової нерівномірності при роботі двигуна та виявити діагностичні ознаки несправностей, які її спричиняють;
- розробити концепцію системи діагностування з застосуванням сучасних та перспективних технологій, притаманних індустрії 4.0;
- розробити ефективні алгоритми для обробки, фільтрації та синхронізації даних, зокрема вдосконалити метод визначення положення верхньої мертвої точки без застосування апаратних датчиків;
- розробити відповідне програмне забезпечення, реалізоване у вигляді кінцевого програмного продукту;
- провести випробування для перевірки надійності та ефективності системи.

Створення таких систем, які мають потенціал інтеграції з сучасними інформаційними системами, є важливим напрямом удосконалення ефективності експлуатації суднових енергетичних установок.

ЛІТЕРАТУРА

1. Суворов П.С., Тарасенко Т.В., Залож В.І. Деякі питання оцінки енергоефективності суден в умовах енергетичного переходу у внутрішньому судноплавстві. *Двигуни внутрішнього згорання*. 2023. Вип. № 2 (2023). С. 37–45. DOI: <https://doi.org/10.20998/0419-8719.2023.2.05>.
2. IMES cylinder pressure sensors : вебсайт. URL: <https://www.imes.de> (дата звернення: 16.01.2024).
3. DEPAS Laboratory : вебсайт. URL: <http://depas.od.ua/> (дата звернення: 11.01.2024).
4. Digital Pressure Indicator DPI Leutert DPI-Type 50 : вебсайт. URL: <https://www.leutert.com/> (дата звернення: 09.01.2024).
5. MAN Energy Solutions PMI : вебсайт. URL: https://www.man-es.com/docs/default-source/document-sync-archive/performance-measurement-indicator-eng.pdf?sfvrsn=8ce6c8eb_4 (дата звернення: 20.01.2024).
6. Pressure and TDC sensors from Kistler : вебсайт. URL: <https://www.kistler.com> (дата звернення: 04.11.2023).
7. MARIDIS Maritime Diagnosis & Service : вебсайт. URL: <https://www.maridis.de/en/contact-us.html> (дата звернення: 24.01.2024).
8. Lemag ECI Electronic Cylinder Pressure Indicator : вебсайт. URL: <https://chris-marine.com/products/monitoring-of-diesel-and-gas-engines/electronic-cylinder-pressure-indicator-eci/> (дата звернення: 24.01.2024).

9. Dimar-Тес PTE Electronic Cylinder Pressure Indicator : вебсайт. URL: <http://dimar-tec.com/product.php?pid=CBM&rcode=CBM003> (дата звернення: 20.01.2024).
10. Кума Diesel Analyzer : вебсайт. URL: www.kuma.no (дата звернення: 10.01.2024).
11. ABB Cylmate : вебсайт. URL: <https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=3BSE035687R0101&LanguageCode=en&DocumentPartId=001&Action=Launch> (дата звернення: 15.01.2024).
12. DocGate 732 e-line : вебсайт. URL: <https://vicusdt.com/en/propulsion-equipment/engine-performance/> (дата звернення: 16.01.2024).
13. Diesel Engine Analysis, Doctor Analysis : вебсайт. URL: <https://iconresearch.co.uk/diesel-engine-analysis/> (дата звернення: 17.01.2024).
14. Tx Marine Messsysteme GmbH PMImk2 : вебсайт. URL: <https://txmarine.com/en/products/cylinderpressure/#toggle-id-1> (дата звернення: 18.01.2024).
15. 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. № 4 (120). P. 81–91. DOI: <https://www.doi.org/10.2478/pomr-2023-0061>.
16. Varbanets R. Determination of top dead centre location based on the marine diesel engine indicator diagram analysis. *Diagnostyka*. 2020. № 21 (1). P. 51–60. DOI: <https://doi.org/10.29354/diag/116585>.
17. Lemag PreMet XL, C Cylinder Pressure Indicator : вебсайт. URL: <http://www.lemag.de/> (дата звернення: 17.01.2024).
18. 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>.
19. CM Technologies Monitoring Innovations : вебсайт. URL: <https://www.cmtechnologies.de/en/products-en/performance-and-efficiency-monitoring/premet-x-en.html> (дата звернення: 20.01.2024).

REFERENCES

1. Suvorov, P. & Tarasenko, Tetyana & Zalozh, Vitalii. (2023). Some issues of vessels energy efficiency assessment in the inland shipping energy transition conditions. *Internal Combustion Engines*, №2 (2023), 37–45. DOI: <https://doi.org/10.20998/0419-8719.2023.2.05>
2. IMES cylinder pressure sensors: web site. URL: <https://www.imes.de> (Retrieved: 16.01.2024).
3. DEPAS Laboratory: web site. URL: <http://depas.od.ua/> (Retrieved: 11.01.2024).
4. Digital Pressure Indicator DPI Leutert DPI-Type 50: web site. URL: <https://www.leutert.com/> (Retrieved: 09.01.2024).

5. MAN Energy Solutions PMI: web site. URL: https://www.man-es.com/docs/default-source/document-sync-archive/performance-measurement-indicator-eng.pdf?sfvrsn=8ce6c8eb_4 (Retrieved: 20.01.2024).
6. Pressure and TDC sensors from Kistler: web site. URL: <https://www.kistler.com> (Retrieved: 04.11.2023).
7. MARIDIS Maritime Diagnosis & Service: web site. URL: <https://www.maridis.de/en/contact-us.html> (Retrieved: 24.01.2024).
8. Lemag ECI Electronic Cylinder Pressure Indicator: web site. URL: <https://chris-marine.com/products/monitoring-of-diesel-and-gas-engines/electronic-cylinder-pressure-indicator-eci/> (Retrieved: 24.01.2024).
9. Dimar-Tec PTE Electronic Cylinder Pressure Indicator: web site. URL: <http://dimar-tec.com/product.php?pid=CBM&pcode=CBM003> (Retrieved: 20.01.2024).
10. Kyma Diesel Analyzer: web site. URL: www.kyma.no (Retrieved: 10.01.2024).
11. ABB Cylmate: web site. URL: <https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=3BSE035687R0101&LanguageCode=en&DocumentPartId=001&Action=Launch> (Retrieved: 15.01.2024).
12. DocGate 732 e-line: web site. URL: <https://vicusdt.com/en/propulsion-equipment/engine-performance/> (Retrieved: 16.01.2024).
13. Diesel Engine Analysis, Doctor Analysis: web site. URL: <https://iconresearch.co.uk/diesel-engine-analysis/> (Retrieved: 17.01.2024).
14. Tx Marine Messsysteme GmbH PMImk2: web site. URL: <https://txmarine.com/en/products/cylinderpressure/#toggle-id-1> (Retrieved: 18.01.2024).
15. Minchev, D., Varbanets, R., Shumylo, O., Zalozh, V., Aleksandrovska, N., Bratchenko, P. & Truong, T. (2023). Digital Twin Test-Bench Performance for Marine Diesel Engine Applications. *Polish Maritime Research*, 30(4) 81–91. DOI: <https://doi.org/10.2478/pomr-2023-0061>.
16. Varbanets, R. A., Zalozh, V. I., Shakhov, A. V., Savelieva, I. V., Piterska, V. M. (2020). Determination of top dead centre location based on the marine diesel engine indicator diagram analysis. *Diagnostyka*, 21(1), 51-60. DOI: <https://doi.org/10.29354/diag/116585>.
17. Lemag PreMet XL, C Cylinder Pressure Indicator: web site. URL: <http://www.lemag.de/> (Retrieved: 17.01.2024).
18. Varbanets, R.A., Zalozh, V.I., Tarasenko, T.V., Kucherenko, Yu.M., Klimenko, V.G. (2020). Features of analytical synchronization of data of working process monitoring in transport diesel engines under operation. *Internal Combustion Engines*, №1, 14–21. DOI: <https://doi.org/10.20998/0419-8719.2020.1.02>.
19. CM Technologies Monitoring Innovations: web site. URL: <https://www.cmtechnologies.de/en/products-en/performance-and-efficiency-monitoring/premet-x-en.html> (Retrieved: 20.01.2024).