

РІЧКОВИЙ ТА МОРСЬКИЙ ТРАНСПОРТ

УДК 621.431.74

DOI <https://doi.org/10.33082/td.2022.3-14.08>

ВИКОРИСТАННЯ ЧИСЛОВИХ ПРОФІЛІВ РОБОЧОГО ПРОЦЕСУ ДЛЯ АНАЛІЗУ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ СУДНОВОГО МАЛООБЕРТОВОГО ДВИГУНА НА РЕЖИМАХ ЧАСТКОВИХ НАВАНТАЖЕНЬ

М.Є. Рибальченко¹, Є.В. Білоусов²

¹аспірант кафедри експлуатації суднових енергетичних установок
Херсонська державна морська академія, Херсон, Україна
ORCID ID: 0000-0003-3533-3967

²д.т.н., професор, професор кафедри експлуатації суднових енергетичних установок
Херсонська державна морська академія, Херсон, Україна
ORCID ID: 0000-0001-8185-8209

Анотація

Вступ. Сучасний стан розвитку суднових двигунів внутрішнього згорання вимагає дотримання жорстких вимог за цілим рядом як економічних так і екологічних показників, дотримання яких можливо тільки за умов перебування двигунів у справному стані. Визначення і підтримання робочого стану двигуна є тією основною задачею яку вирішують судові механіки під час експлуатації. Ефективне визначення стану ґрунтується на порівнянні текучих параметрів стану або характеру процесів, що видобуваються у робочому просторі двигуна, з еталонними значеннями або кривими, що характеризують перебіг процесів.

Ціль роботи. Враховуючи значні зміни у логістичній системі сучасного судноплавства та зростанням екологічних вимог, нагальною є потреба у визначенні еталонних параметрів робочого процесу на режимах часткових навантажень двигуна, для проведення діагностичних процедур під час експлуатації судна на визначеному ходовому режимі. Саме вирішенню цих питань присвячене це дослідження.

Основна частина. За допомогою методології створення цифрового профілю робочого процесу суднового малообертового двигуна, оснований на апроксимації базових діаграм отриманих під час його стендових випробувань, визначається набір числових масивів, що відповідають індикаторним діаграмам двигуна у всьому діапазоні режимів роботи, з кроком в 1 % по навантаженню.

Розроблений авторами розрахунковий комплекс дозволяє експортувати до нього масиви даних для неспіціфікаційних режимів як у вигляді еталонних діаграм, так і даних отриманих у результаті індиціювання двигуна під час його експлуатації. За результатами обробки масивів розрахунковий комплекс формує набір діаграм робочого процесу у $r\phi$ та rV -координатах, а також діаграм які характеризують динамічність робочого процесу та процесу тепловиділення. Обробка

даних діаграм дозволяє визначити розширений, у порівнянні з іншими аналогічними комплексами, набір параметрів, що характеризують перебіг робочого процесу.

Висновки. Розроблена методологія дозволяє забезпечити процес діагностування двигуна за параметрами робочого процесу базою для порівняння фактичних показників з розрахунковими еталонними, у всьому діапазоні робочих режимів двигуна.

Ключові слова: судновий малообертовий двигун, індичіювання, індикаторна діаграма, 3D-поверхня робочих режимів.

USAGE OF NUMERICAL PROFILES OF THE WORK PROCESS TO ANALYZE THE EFFICIENCY OF THE LOW-SPEED MARINE ENGINE AT PARTIAL LOADS

M.Y. Rybalchenko¹, I.V. Bilousov²

¹Postgraduate student of the Department "Operation of Ship Power Plants"

Kherson State Maritime Academy, Kherson, Ukraine

ORCID ID: 0000-0003-3533-3967

²PhD (Engineering), Professor,

Professor at the Department Operation of Ship Power Plants,

Kherson State Maritime Academy, Kherson, Ukraine

ORCID ID: 0000-0001-8185-8209

Summary

Introduction. The current state of development of marine internal combustion engines demands compliance with strict requirements for a number of economic and environmental characteristics, compliance with which is possible only if the engines are in good condition. The main task that vessels engineers solve during routine operation is examination and support of the engine condition in good order. Effective determination is based on a comparison of the current parameters of the processes in the engine's working space with reference values or curves which are characterizing the course of the processes.

Purpose. Taking into account the significant changes in the logistics systems of modern shipping and the growth of environmental requirements, the main thing is the necessity for defined reference parameters of the work process at partial engine load modes, for carrying out diagnostic procedures during the vessel's operation at the specified operating mode. This research is devoted to the solution of these questions.

Results. Using the methodology of creating a digital profile of the working process of a low-speed marine engine, based on the approximation of the basic diagrams obtained during its bench tests, a set of numerical arrays corresponding to the indicator diagrams of the engine is determined on the whole range of operating modes with a step of 1% depending on the load. The calculation complex developed by the authors allows you to export to it data's arrays for non-specification modes both: in the form of reference diagrams and in the form of data obtained as a result of engine indication during its operation. Based on the results of array processing, the calculation complex forms a set of diagrams of the work process in $p\phi$ - and pV -coordinates, as well as diagrams characterizing the dynamics of the work process and the process of heat generation. The processing of these diagrams allows you to define a set of parameters that characterize

the course of the work process, which is expanded in comparison with other similar complexes.

Conclusions. *The developed methodology makes it possible to provide the process of engine diagnostics according to the parameters of the work process, by a basis for comparing actual indicators with calculated reference ones in all areas of engine operating modes.*

Key words: *low-speed marine engine, indication, indicator diagram, 3D surface of operating modes.*

Вступ

Безпека експлуатації суден значною мірою визначається правильністю використання та діагностики їх енергетичних установок. Головний двигун та його допоміжні системи на борту суден працюють у важких умовах, що істотно змінює їх характеристики та може викликати підвищений знос, відмови в роботі та, в деяких випадках, навіть спричинити аварію. Моніторинг стану ДВЗ є одним із шляхів покращення ефективності технічного обслуговування, ремонту та збільшення експлуатаційної надійності суднових дизелів, допомагає передбачити та уникнути багатьох поломок його елементів.

Критерієм справної роботи двигуна є відповідність його показників енергетичним, екологічним та експлуатаційним параметрам встановленим заводом-виробником, що забезпечується правильним перебігом робочого процесу. Тому індичюванню, як одному з основних видів діагностики суднових двигунів приділяють прискіпливу увагу під час їх експлуатації.

Актуальність теми

З 2007 року судноплавні компанії які займалися контейнерними перевезеннями почали впроваджувати режими повільного руху (slow steaming) суден, зменшивши їх комерційну швидкість з 22...25 вузлів до 18 вузлів або навіть менш (super slow steaming – 15 вузлів) [1; 2]. Першочерговим поштовхом для запровадження режимів slow steaming стала необхідність економії палива в період, коли ціна на бункерування швидко зростала з \$150...200 до \$600...750 за тону. Наприклад, в січні 2007 року вартість палива за тону IFO380 у Роттердамі зросла з \$220 до піку понад \$700 в середині липня 2008 року [3]. У подальшому ціни суттєво коливалися залишаючись на рівні \$700...800 по теперішній час.

Зараз концепція повільного руху, попередньо впроваджена на контейнеровогах, запозичена іншими компаніями – операторами інших типів суден, включаючи танкери та суховантажні судна, робочі швидкості яких і так традиційно низькі.

Більш того, сучасні судноплавні компанії вимагають підтримувати швидкість незмінною на протязі всього рейсу, оскільки рух з постійною швидкістю призводить до значно меншої витрати палива (приблизно на 15...25%), ніж аналогічний рух з різними швидкісними режимами на окремих ділянках рейсу, навіть коли середня швидкість суден може бути однаковою.

Ще одним фактором який останнім часом впливає на тенденцію зменшення швидкості суден є зростання вимог щодо зменшення шкідливих викидів з відпрацьованими газами двигунів. Так згідно Міжнародної конвенції щодо запобігання забрудненню атмосфери з суден [4] оксидами азоту (NO_x), загальні питомі викиди

останніх, сучасними малооберттовими двигунами, не повинні перевищувати 3,4 г/(кВт×год.).

Так, через причини описані вище, компанія MAERSK (штаб квартира м. Копенгаген, Данія), що є провідним оператором з контейнерних перевезень, знизила середнє навантаження головних двигунів суден задіяних на трансокеанічних лініях приблизно з 57% до 35% від номінальної потужності, [5]. Аналогічні висновки можна зробити і з власного досвіду автора. Аналіз швидкісних режимів суден на яких йому довелося працювати у період з 2016 по 2020 роки на посаді старшого механіка, показує наступне: частина ходового часу з навантаженням більше 50% від номінальної потужності головного двигуна займала не більше 13% загального часу роботи.

Вищезазначені тенденції в організації перевезень унеможливають задовільну оцінку технічного стану малооберттових головних двигунів шляхом зняття індикаторних діаграм їх робочого процесу, оскільки це потребує виведення його на режим роботи максимально наближений до номінального на досить тривалий час.

Формулювання мети дослідження

Виходячи в наведеного аналізу слідує, що на теперішній час є нагальна проблема оцінки параметрів робочого процесу двигун на режимах відмінних від номінальних, яка може бути вирішена шляхом створення цифрових профілів у вигляді 3D-поверхонь, що пов'язують між собою кут оберту колінчатого валу, тиск у робочому циліндрі і навантаження двигуна. Ці профілі, можуть бути використані для оцінки ефективності роботи двигуна на будь-якому режимі навантаження, а також для визначення його технічного стану.

Виклад основного матеріалу

Для вирішення зазначеної проблеми авторами було запропоновано метод отримання розрахункових еталонних індикаторних діаграм для будь-якого режиму роботи двигуна, оснований на побудові 3D-поверхні робочих режимів ДВЗ, з використанням в якості базових кривих, індикаторних діаграм, взятих з протоколу стендових випробувань двигуна заводу-виробника [6]. Візуалізація за допомогою 3D-графіки дозволяє надати уявлення о характері протікання робочого процесу на різних режимах навантаження двигуна. Приклади 3D-поверхонь робочих режимів отримані авторами для двигуна 8K90MC-C виробництва компанії HSD-MAN B&W наведено на рис. 1.

Джерелом інформації для оцінки параметрів робочого процесу виступають електронні пристрої для зняття індикаторних діаграм номенклатура яких є дуже широкою. До числа таких пристроїв відносяться виробі закордонних фірм, таких як Friedrich Leutert GmbH & Co. KG (Німеччина) [7]; ICON Research (Великобританія) [8]; IMES GmbH (Німеччина) [9]; Präzisions-Messtechnik Baewert GmbH. (Німеччина) [10], MAN Diesel (Данія) [11]; WIKA Alexander Wiegand SE & Co. KG. (Німеччина) [12]. Кума А.С., (Норвегія) [13] та ін. Серед вітчизняних пристроїв особу увагу заслуговують системи DEPAS, розроблені в Одеському національному морському університеті, під керівництвом професора Варбанця Р.А. [14]. Ці пристрої дозволяють отримати набір параметрів робочого процесу, та його представлення у вигляді графічних залежностей в pV та pV -координатах.

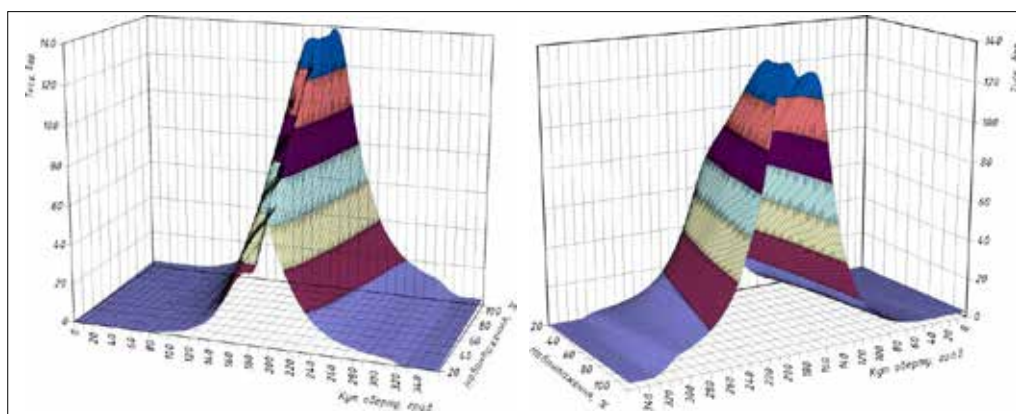


Рис. 1. Приклади 3D-поверхні робочих режимів для двигуна 8K90MC-C виробництва компанії HSD-MAN B&W

Слід відзначити, що більшість діагностичних систем, які зараз використовуються на флоті, дають досить обмежену номенклатуру даних за результатами обробки отриманих індикаторних діаграм. В якості прикладу, на рис. 2, наведено інтерфейс виводу розрахункових даних отриманих за результатами ініціювання двигуна за допомогою переносного пристрою Kuma Diesel Analyzer .

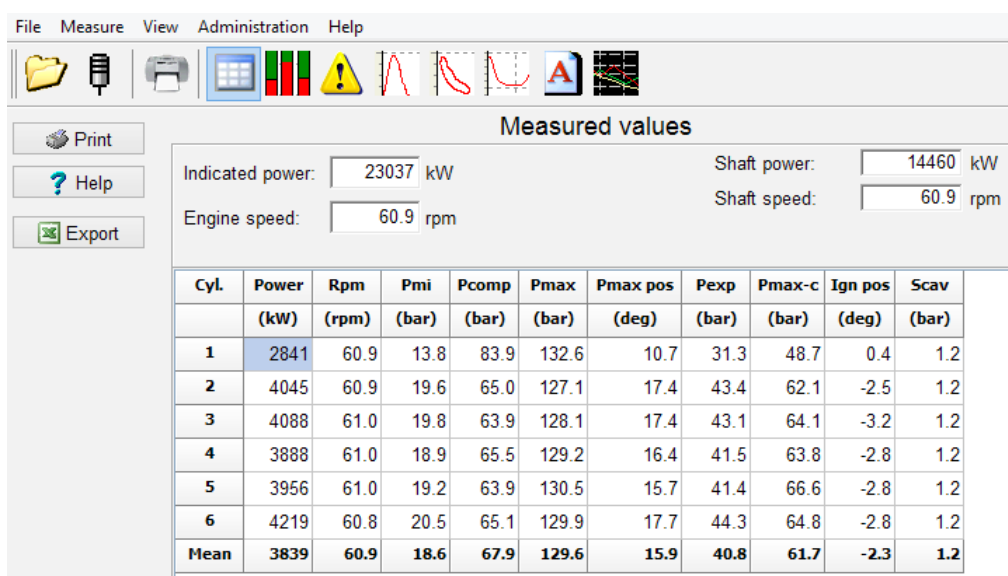


Рис. 2. Інтерфейс виводу розрахункових даних отриманих за результатами ініціювання двигуна за допомогою переносного пристрою Kuma Diesel Analyzer

Окрім виводу графічного відображення індикаторних діаграм у $p\phi$ та pV -координатах, користувачу надається обмежена номенклатура параметрів робочого процесу, а саме: циліндрова потужність (Power); частота обертання (Rpm); середній індикаторний тиск (Pmi); тиск наприкінці стискання (Pcomp); максимальний

тиск циклу (P_{max}); кут досягнення максимального тиску після ВМТ ($P_{max\ pos}$); тиск на лінії розширення при кути 40° після ВМТ (P_{exr}); підвищення тиску у робочому циліндрі в наслідок згоряння (P_{max-c}); кут початку згоряння відносно ВМТ ($I_{gn\ pos}$) и тиск наддувочного повітря ($Scav$).

Але використання цього набору даних в діагностичних цілях дуже ускладнено. В основі більшості методів діагностування лежить порівняння даних отриманих під час обстеження двигуна у процесі експлуатації з значеннями які приймаються в якості еталонних. І саме у цьому полягають складності. Більшість настановних документів рекомендують в якості еталонних використовувати параметри які знято зі справного двигуна (циліндра) на номінальному режимі, однак як визначити ступінь відповідності двигуна справному стану на режимі відмінному від номінального? Для цього треба мати критерії для такого визначення. Таким чином виникає замкнуте коло, щоби визначити справність двигуна необхідні об'єктивні критерії, а щоби мати ці критерії необхідно якимось чином визначитись зі ступеню справності двигуна. В деяких випадках механікам, рекомендується порівнювати отримані параметри з середніми значеннями (саме для цього ці значення окремо розраховуються програмою обробки даних, рис. 2), однак з рис. 2 видно, як відхилення одного циліндру впливають в загалом на весь набір середніх значень. Тому ефективність такого підходу теж дуже сумнівна. Теж саме стосується і графічних відображень індикаторних діаграм у $r\phi$ та p/V -координатах за формою яких пропонується визначити відхилення від нормального перебігу робочого процесу.

Якщо для режимів номінальних навантажень у якості еталонних індикаторних діаграм можуть бути використані діаграми отримані під час стендових випробувань двигуна його виробником, що вже згадувалось вище, то для інших режимів, автори пропонують отримувати еталонні діаграми аналітично, як це показано у роботі [6].

Спираючись на результати аналізу, для демонстрації методу, в якості розрахункового режиму розглянемо роботу двигуна на навантаженні 47% від номінальної потужності. Вибір саме такого навантаження відповідає найбільш поширеному режиму експлуатації головного двигуна серії 8K90MC-C судна ZIM LUANDA (IMO 9403229). Саме таке навантаження дозволяє гарантовано експлуатувати двигун на режимі вище межі включення/виключення допоміжних повітряних продувочних насосів.

Для отримання розрахункової індикаторної діаграми у в $r\phi$ -координатах 3D-поверхню робочих режимів необхідно перетнути площиною перпендикулярною вісі навантажень. Для числового профілю, створеного за допомогою програмного середовища MATLAB & Simulink, щоби виконати цю процедуру достатньо задати координати однієї точки яка належить даній кривій.

В наслідок такого перетину, отримуємо теоретичну еталонну індикаторну діаграму в $r\phi$ -координатах на відповідному режимі (рис. 3).

За результатами обробки базових діаграм за допомогою апроксимації з використанням поверхонь Кунса [15] можливо отримати набір числових масивів, з шагом від 1% по навантаженню, в усьому діапазоні робочих режимів двигуна, який відображає відповідні індикаторні діаграми у $r\phi$ -координатах. Ці масиви можуть бути збережені у любому форматі, включаючи і найбільш поширений формат для

збереження числових даних – Microsoft Excel. Слід відзначити, що саме в цьому форматі судновими механіками ведеться більшість електронних протоколів дослідження технічного стану суднового обладнання и саме в цей формат експортуються данні більшістю програмних продуктів, що йдуть у комплекті з вимірювальними комплексами для індиціювання робочого процесу (рис. 2). Саме тому робота з зазначеними масивами не повинна викликати труднощів у персоналу, що обслуговує енергетичну установку.

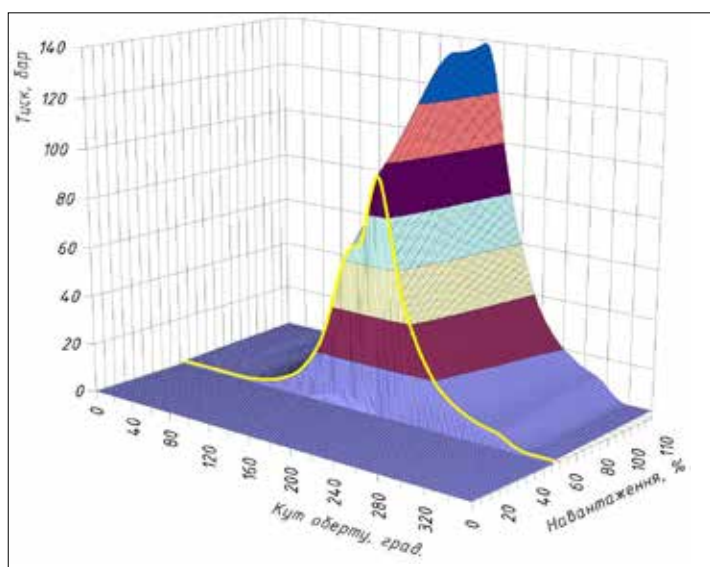


Рис. 3. Приклади отримання розрахункової індикаторної діаграми в рф-координатах для навантаження 47% від номінальної потужності, шляхом перетину 3D-поверхні робочих режимів двигуна 8K90MC-C

Створення числового профілю по базовим діаграмам отриманим у ході приймально-здавальних випробувань двигуна (рис. 1), відбувається за спеціально розробленою методикою з використанням різноманітного програмного забезпечення [6] і виконується окремо для кожного двигуна. Це пояснюється тим, що судові малооберткові двигуни є дуже специфічним виробом, тому навіть однотипні двигуни, побудовані різними виробниками в залежності від технологій за якими вони вироблялися, навішаного устаткування, яке може мати відмінні характеристики, налаштування окремих агрегатів і систем, можуть суттєво відрізнитися за характером протікання робочого процесу [6]. Саме тому кожен двигун має свій, досить унікальний цифровий профіль який може бути створено за замовленням судовласника на першому етапі вирішення задачі діагностування двигуна на режимах часткових навантажень. Результатом першого етапу, саме і є створення 3D-поверхні робочих режимів у вигляді числових масивів та надання у супроводі з ними спеціально розробленого розрахункового комплексу, який дозволяє робити поглиблений аналіз робочих процесів з використанням індикаторних діаграм, як експортованих з числового профілю, так і отриманих під час експлуатаційних випробувань двигуна на різних режимах навантаження.

У розрахунковому комплексі реалізовано принцип попередньої обробки імпортованих числових масивів і побудови за ними індикаторних діаграм у $p\phi$ та pV -координатах (рис. 4) [16].

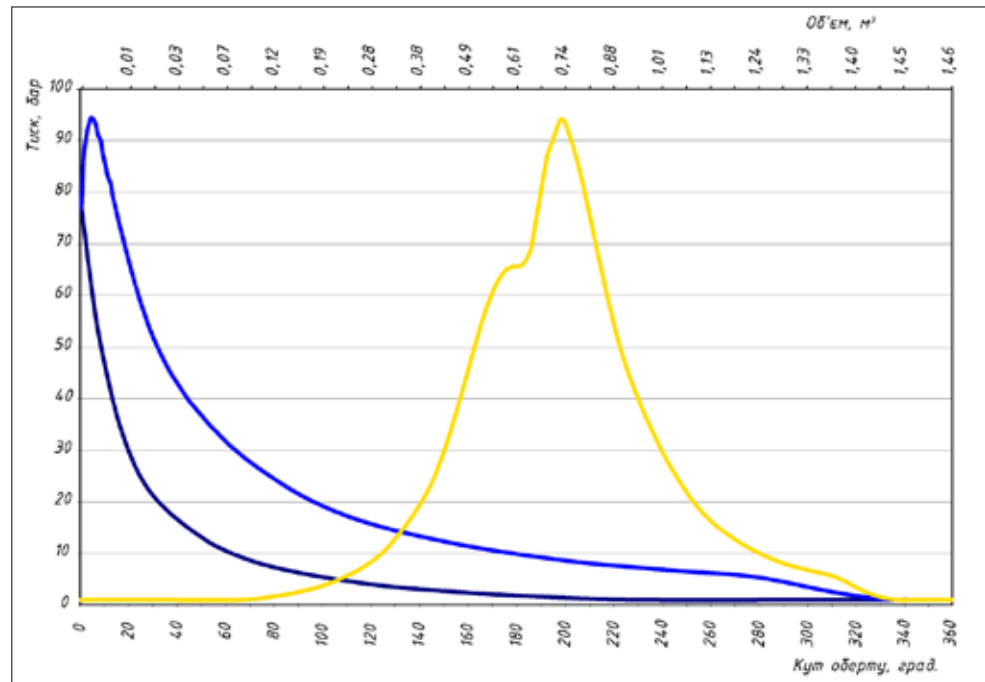


Рис. 4. Індикаторні діаграми у $p\phi$ та pV -координатах побудовані за результатами апроксимації базових кривих для режиму навантаження 47% від номінальної потужності

Подальша обробка діаграм у pV -координатах використовується для визначення енергетичних показників робочого процесу, а у $p\phi$ -координатах для визначення динамічних показників.

На рис. 5, представлено динамічні характеристики робочого процесу та процесу тепловиділення в наслідок згоряння палива, отримані за результатами обробки розрахунковим комплексом еталонної індикаторної діаграми відділеної з масиву даних числового профілю робочого процесу для навантаження 47% від номінальної потужності.

У результаті обробки отриманих діаграм розрахунковим комплексом відзначається ряд показників, які найбільш суттєво характеризують робочий процес та його перебіг. За результатами цих розрахунків інтерфейсом формується таблиця параметрів які виводяться на екран монітору, або роздруковуються на принтері.

При подальшому аналізі технічного стану двигуна або відповідності його регулювань початковим, виконаним заводом-виробником, саме ці параметри можуть бути використані як база для порівняння (табл. 1).

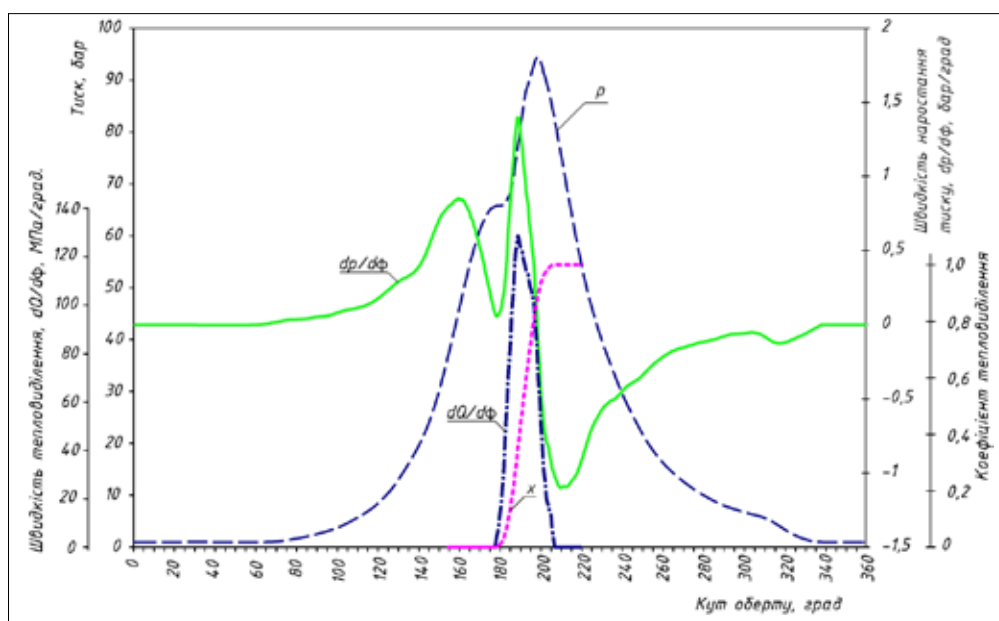


Рис. 5. Розрахункові діаграми динамічності робочого процесу та процесу тепловиділення отримані за результатами обробки розрахункової еталонної індикаторної діаграми для режиму навантаження двигуна 47% від номінальної потужності

Таблиця 1

**Розрахункові параметри робочого процесу двигуна 8K90MC-C
для навантаження 47% від номінальної потужності**

Параметр	Знач.	Параметр	Знач.
1	2	3	4
Вихідні данні			
Максимальний тиск циклу, p_{max} , бар	97	Швидкість наростання тиску $dp/d\phi$, МПа/°	0,140
Оберти двигуна, хв ⁻¹	81	Максимальна температура циклу T_{max} , °С	1836,4
Результати розрахунків			
Паспортна питома витрата палива, г/(кВт×год.)	172,0	Кут досягнення T_{max} , ° після ВМТ	26
		Кут закінчення згорання, ° після ВМТ	27
Газообмін			
Щільність повітря на вході до циліндра, кг/м ³	2,229	Теплота за цикл теоретична, кДж розширення	3102,5
Маса заряду циліндра, кг	2,500	Робота розширення, кДж	2631,6
Питома витрата повітря кг/(кВт×год.)	8,487	Баланс $L_{стис.} = L_{розшир.}$, ° після ВМТ	40
Коефіцієнт надлишку повітря	3,403	Кут відкриття випускного клапану, ° до НМТ	48,5
Кут закриття виходу, ° після НМТ	31		
Кут закриття випускного клапану, ° після НМТ	57,5	Температура на початку випуску відпрацьованих газів, °С	822,77
Втрата робочого об'єму на газообмін, м ³	0,424	Тиск на початку випуску, МПа	0,510

Закінчення таблиці 1

1	2	3	4
Частка втраченого ходу на газообмін	0,290	Кут відкриття продувочних вікон, °до НМТ	31
Стискання			
Тиск наприкінці стискання, МПа (ВМТ)	6,581	Показники робочого процесу	
		Середній індикаторний тиск, МПа	1,116
Температура заряду наприкінці стискання, T_c , °С	960,3	Індикаторна потужність циліндру, кВт	2204,8
Робота стискання, кДж	998,46	Індикаторна потужність двигуна, кВт	17638,1
Згоряння			
Циклова подача, кг	0,073	Ефективна потужність, кВт	16579,8
Кут початку згоряння, °до ВМТ	1,0	Робота за цикл, кДж	1633,16
Максимальний тиск циклу p_{max} , МПа	9,44	Індикаторний ККД циклу	0,526
Кут досягнення p_{max} , °після ВМТ	17,5	Ефективний ККД двигуна	0,494

В такий же спосіб, за допомогою розробленого авторами розрахункового комплексу можуть бути оброблені індикаторні діаграми отримані під час експлуатації двигуна на аналогічному режимі.

Кінцевим результатом розрахунків є два блоки параметрів: еталонних та отриманих під час планового обстеження двигуна. Шляхом порівняння цих параметрів, за існуючими методиками, здійснюється оцінка його технічного стану та правильності регулювання.

У подальшому ця технологія може бути використана як складова частина сучасних діагностичних комплексів, які знаходять все більше застосування на суднах, у тому числі обладнаних двигунами з електронним керуванням.

Висновки

Розроблено методологію отримання еталонних розрахункових індикаторних діаграм для всього діапазону робочих режимів двигуна з застосуванням цифрового профілю робочого процесу. За допомогою розрахункового комплексу, запропонованого авторами, може бути виконано розширений аналіз робочого процесу двигуна з отриманням параметрів, що характеризують його перебіг. Ці параметри можуть бути використані як базові для порівняння з результатами індиціювання двигуна під час його експлуатації.

Порівняння обох блоків параметрів є базою для визначення технічного стану двигуна та правильності його регулювань.

Числові профілі робочого процесу, методологія отримання яких розроблена авторами, може бути використана як складова частина для сучасних діагностичних комплексів, що знаходять подальше поширення на суднах обладнаних двигунами з електронними системами керування.

ЛІТЕРАТУРА

1. Sartini N. More haste less speed. *Container ship focus*. Lloyd's Register, September 2008. Issue 5. P. 3.

2. Slow Steaming (SS) or Super Slow Steaming (SSS) for Container Shipping Part I. *Universal cargo*. January 11, 2011. URL: <https://www.universalcargo.com/slow-steaming-ss-or-super-slow-steaming-sss-for-container-shipping-part-i/>. (дата звернення: 10.09.2022).
3. Notteboom T., Pallis A., Rodrigue. J. Slow steaming in container shipping. *Port Economics, Management and Policy*. New York : Routledge. 2022. URL: <https://portconomicsmanagement.org/pemp/contents/part1/ports-and-container-shipping/slow-steaming-container-shipping/>. (дата звернення: 10.09.2022).
4. IMO. Annex VI of MARPOL 73/78 Regulations for the prevention of Air pollution from ships and NO_x technical code. International Marine Organization. London. UK, 1998. 12 p.
5. Delft. An Assessment of Options, Costs and Benefits. *Regulated Slow Steaming in Maritime Transport*. Report. February 2012, P. 25.
6. Білоусов Є.В., Марченко А.П., Рибальченко М.Є., Савчук В.П., Тулученко Г.Я. (2022). Розробка методів оцінки технічного стану двигунів за результатами індиціювання робочого процесу на режимах відмінних від номінальних. *Двигуни внутрішнього згоряння*. № 1.
7. DPI-2 Digital Pressure Indicator Operating Instructions. DPI hand-held unit, version 2.04, Friedrich Leutert GmbH & Co. KG, Germany, Adendorf, Apr. 2014. 54 p.
8. Doctor DK Series. Operating Manual, Revision 2.5. / ICON Research, UK, East Calder, October 2004. 44 p.
9. Intelligent Measuring Systems for economic engine operation. IMES GmbH, Germany, Kaufbeuren. 2012. 12 p.
10. HLV 2005 MK. Short Operating Instructions for the Electronic Indicator. Präzisions-Messtechnik Baewert GmbH. Germany, Meerane, 2006. 26 p.
11. Off-line PMI System Pressure Analyser User's Guide. Reg. № 39661314, MAN Diesel, Denmark, Copenhagen, Jun 2007. 70 p.
12. Hand-held pressure indicator. Model CPH6300-S1 (1-channel version). Model CPH6300-S2 (2-channel version). / WIKA Alexander Wiegand SE & Co. KG., Germany, Klingenberg, 2017. 11 p.
13. Кума Diesel Analyzer. MIP system to optimize the performance of diesel engines. Кума А.С., Bergen, Norway. 2011. 6 p.
14. DEPAS Handy. Diesel engine performance analysing system. / Internal Combustion Engine Monitoring Laboratory of Odessa National Maritime University. Ukraine, Odessa. 2003. 6 p.
15. Jean Gallier (2000). Curves and surfaces in geometric modeling: theory and algorithms. Philadelphia: University of Pennsylvania. 492 p.
16. Білоусов Є.В., Марченко А.П., Рибальченко М.Є., Савчук В.П., Тулученко Г.Я. Оцінка технічного стану двигунів за параметрами робочого процесу на режимах часткових навантажень. XXVII міжнародний Конгрес двигунобудівників, 5–10 вересня 2022 р. С. 23-24.

REFERENCES

1. Sartini N. More haste less speed. *Container ship focus. Lloyd's Register*, September 2008 Issue 5. P. 3.
2. Slow Steaming (SS) or Super Slow Steaming (SSS) for Container Shipping Part I. *Universal cargo*. January 11, 2011. URL: <https://www.universalcargo.com/slow-steaming-ss-or-super-slow-steaming-sss-for-container-shipping-part-i/>. (date to adress: 10.09.2022).
3. Notteboom T., Pallis A., Rodrigue. J. Slow steaming in container shipping. *Port Economics, Management and Policy* New York: Routledge. 2022. URL: <https://porteeconomicsmanagement.org/pemp/contents/part1/ports-and-container-shipping/slow-steaming-container-shipping/>. (date to adress: 10.09.2022).
4. IMO. Annex VI of MARPOL 73/78 Regulations for the prevention of Air pollution from ships and NO_x technical code. International Marine Organization. London. UK, 1998. 12 p.
5. Delft, The ICCT, Mikis Tsimplis. An Assessment of Options, Costs and Benefits. *Regulated Slow Steaming in Maritime Transport*, February 2012, P. 25.
6. Bilousov I.V., Marchenko A.P., Rybalchenko M.Y., Savchuk V.P., Tuluchenko H.Y. (2022). Development of methods for evaluating of technical condition of engines according to the results of indicating of working process on modes excellent from nomin. [Rozrobka metodiv otsinky tekhnichnoho stanu dvyhuniv za rezultatamy indytsiuvannia robochoho protsesu na rezhymakh vidminnykh vid nominalnykh]. *Internal combustion engines*. № 1. [in Ukrainian]
7. DPI-2 Digital Pressure Indicator Operating Instructions. DPI hand-held unit, version 2.04., Friedrich Leutert GmbH & Co. KG, Germany, Adendorf, Apr. 2014. 54 p.
8. Doctor DK Series. Operating Manual, Revision 2.5. / ICON Research, UK, East Calder, October 2004. – 44 p.
9. Intelligent Measuring Systems for economic engine operation. IMES GmbH, Germany, Kaufbeuren. 2012. – 12 p.
10. HLV 2005 MK. Short Operating Instructions for the Electronic Indicator. Präzisions-Messtechnik Baewert GmbH. Germany, Meerane, 2006. 26 p.
11. Off-line PMI System Pressure Analyser User's Guide. Reg. № 39661314, MAN Diesel, Denmark, Copenhagen, Jun 2007. 70 p.
12. Hand-held pressure indicator. Model CPH6300-S1 (1-channel version). Model CPH6300-S2 (2-channel version). / WIKA Alexander Wiegand SE & Co. KG., Germany, Klingenberg, 2017. 11 p.
13. Kyma Diesel Analyzer. MIP system to optimize the performance of diesel engines. Kyma A.S., Bergen, Norway. 2011. 6 p.
14. DEPAS Handy. Diesel engine performance analysing system. / Internal Combustion Engine Monitoring Laboratory of Odessa National Maritime University. Ukraine, Odessa. 2003. 6 p.

15. Jean Gallier (2000). Curves and surfaces in geometric modeling: theory and algorithms. Philadelphia: University of Pennsylvania. 492 p.
16. Bilousov I.V., Marchenko A.P., Rybalchenko M.Y., Savchuk V.P., Tuluchenko H.Y. Evaluation of the technical condition of engines according to the parameters of the working process at partial load modes. [Otsinka tekhnichnoho stanu dvyhuniv za parametry robochoho protsesu na rezhymakh chastkovykh navantazhen]. XXVII International congress of engine builders, 5-10 September 2022. P. 23-24. [in Ukrainian]