

Варбанець Роман Анатолійович, д.т.н. професор, завідувач кафедри «Суднові енергетичні установки та технічна експлуатація» Одеського національного морського університету, консультант IMES GmbH, м. Одеса, roman.varbanets@gmail.com.

Кучеренко Юрій Миколайович, к.т.н. доцент кафедри «Суднові енергетичні установки та технічна експлуатація» Одеського національного морського університету, kucherenko.iurii@gmail.com.

Мінчев Дмитро Степанович, к.т.н. доцент кафедри «Двигуни внутрішнього згоряння, установки та технічне обслуговування» Національного університету кораблебудування імені Адмірала Макарова, misaidima@gmail.com.

Кирнац Владислав Іванович, к.т.н. доцент кафедри «Суднові енергетичні установки та технічна експлуатація» Одеського національного морського університету, м. Одеса, kirmacsvlad@gmail.com.

Кирилаш Олена Іванівна, к.т.н. доцент кафедри «Суднові енергетичні установки та технічна експлуатація» Одеського національного морського університету, м. Одеса, kirilashelena@gmail.com.

Stefan Neumann, генеральний директор IMES GmbH, дипломований інженер з енергетики та теплотехніки, 87600 Kaufbeuren Germany, info@imes.de.

## **ДІАГНОСТИКА ДВОТАКТНИХ ДВИГУНІВ MAN B&W НА ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ MAHON (MENORCA) СПІЛЬНО З IMES GMBH**

Специфіка експлуатації морських двигунів полягає в тому, що від їхньої безперервної безаварійної роботи залежить життя судна та екіпажу. В даному випадку, надійна робота двигунів електростанції Mahon забезпечує екологічну безпеку життя жителів іспанських островів в умовах автономного існування [1]. Безаварійну роботу двигунів можна забезпечити за допомогою регулярного контролю параметрів робочого процесу в циліндрах. Регулярний періодичний аналіз параметрів робочого процесу в циліндрах двигунів дає можливість оптимізувати їхню роботу, рівномірно розподіляти навантаження між циліндрами та вчасно виявляти небезпечні тенденції у зміні технічного стану основних систем та вузлів [2 – 8].

Періодичний контроль дозволяє виявляти дефекти, що зароджуються під час експлуатації. Прикладами таких дефектів є зниження середнього індикаторного тиску MIP або тиску кінця стиснення  $P_{comp}$ , що відразу буде виявлено шляхом аналізу індикаторних діаграм  $P(CA, deg)$ . Однак існує ряд дефектів, виявити які за допомогою лише аналізу індикаторних діаграм досить складно. Йдеться про дефекти паливної апаратури високого тиску та дефекти механізму управління клапанами газорозподілу.

Саме ці дефекти найчастіше виникають у процесі експлуатації морських двигунів. Особливо це стосується дефектів паливної апаратури високого тиску. Безпосередні вимірювання та аналіз діаграм тиску упорскування палива перед форсунками могли б дати повну діагностичну інформацію про технічний стан паливної системи високого тиску, проте такі вимірювання неможливо проводи-

ти на морських двигунах за допомогою переносних пристроїв в умовах експлуатації у зв'язку з сучасними вимогами ІМО та вимогами більшості сертифікаційних морських товариств [9]. Альтернативою прямим вимірам є застосування вібродатчика на магнітній платформі [5 – 8].

Деякі дефекти можуть бути виявлені шляхом аналізу індикаторних діаграм, аналізу їх форми на ділянках стиснення та згоряння, а також аналіз основних параметрів робочого процесу (таблиця 1) [2]. Однак, існує також думка, що аналіз одних тільки індикаторних діаграм  $P(\text{CA}, \text{deg})$  не достатній для точної діагностики [4 – 8]. Багато ознак дефектів, які виявляються на індикаторних діаграмах, можуть бути викликані різними причинами. Наприклад, пізнє згоряння палива в циліндрі, виявлене шляхом аналізу фаз початку згоряння (ignition points), може бути наслідком як пізнього кута впорскування палива, так і зношування прецизійних вузлів паливної апаратури високого тиску і зниження тиску палива перед форсунками при упорскуванні.

Таблиця 1. Параметри робочого процесу, що визначаються в експлуатації

$P_{\max}$ ( $P_z$ )	Maximum combustion pressure and corresponding crank angle, Bar / °CA
$P_{\text{comp}}$	Maximum compression pressure, Bar
IMEP (MIP)	Mean Indicated Pressure, Bar
IPOWER	Indicated Cylinder Power, kW
$P_{\text{ignition}}$	Combustion start pressure and corresponding crank angle, Bar / °CA
$P_{\text{exp}}$ ( $P_{36}$ )	Pressure at 36 °CA after TDC
Fuel Injection Timing	Real and Geometrical phases of fuel injection, °CA
Valves Timing	Intake and Exhaust valves timing phases, °CA
Fuel Ignition Delay	Period from the Start of Injection to the Start of Combustion, °CA (ms)
DeltaG	Difference between Real and Geometrical phases of fuel injection, °CA

При аналізі одного з найбільш характерних дефектів ЦПГ - зниження компресії в робочому циліндрі - теж існує неоднозначність при аналізі одних тільки індикаторних діаграм. Зниження компресії може бути викликане наступними причинами: зносом втулки циліндра, зносом та/або залипанням поршневих кілець, нещільністю закриття клапанів або порушенням фаз газорозподілу. Всі ці причини спричиняють один наслідок – зниження параметра  $P_{\text{comp}}$  і за ним  $P_{\max}$  і MIP. Таким чином, справжня причина дефекту може бути нез'ясованою.

Основними показниками роботи циліндрів, що визначаються за допомогою аналізу індикаторних діаграм, є середній індикаторний тиск та індикаторна потужність циліндрів. Проте точна причина зниження чи збільшення цих показників може бути нез'ясованою без аналізу додаткової інформації. Одним із способів отримання додаткової інформації є використання математичного моделювання робочого процесу двигуна [10 – 12], що дозволяє у ряді випадків уточнити причини тих чи інших відхилень або дефектів. Тим не менш, можливість вимірювань параметрів, що цікавлять, під час експлуатації є переважною.

За допомогою математичного моделювання ми розглянули наслідки можливих несправностей судових дизельних двигунів. Математичне моделювання дає можливість уточнити вплив заданих параметрів на загальні характеристики робочого процесу двигуна. В перш чергу на його потужність, економічність та екологічність. Математичне моделювання також робить прогнози, які корисні для вчасного виявлення різних несправностей на практиці.

Математична модель базується на квазістаціонарних та одновимірних не-стаціонарних системах рівнянь, які описують процеси у відкритих термодинамічних системах, що є складовими загальної термодинамічної системи – двигуна.

Набори квазістаціонарних рівнянь включають перший закон термодинаміки, баланс мас і диференціальні рівняння стану газу. Його можна виразити для однозонних і двозонних відкритих термодинамічних систем в наступному вигляді:

$$\left( \frac{dI_{fuel}}{d\phi} + \sum_1^{n_1} \frac{dI_j}{d\phi} \right) + \frac{\delta Q_{comb}}{d\phi} + \sum_1^{n_2} \frac{\delta Q_{wall.i}}{d\phi} = c_{vm} T \left( \sum_1^{n_1} \frac{dm_j}{d\phi} + \frac{dm_{fuel}}{d\phi} \right) + c_v m \frac{dT}{d\phi} + m T \frac{d(c_v)_T}{d\phi} + p \frac{dV}{d\phi}, \quad (1)$$

Де  $dI_{fuel}/d\phi$ ,  $dI_j/d\phi$  – швидкість зміни ентальпії внаслідок масообмінних процесів,

$\delta Q_{comb}/d\phi$  – швидкість виділення тепла внаслідок згоряння палива,

$\delta Q_{wall.i}/d\phi$  – швидкість теплопередачі до стінок системи,

$dm_{fuel}/d\phi$ ,  $dm_j/d\phi$  – масовий витрата палива і масовий витрата газів,

$n_1$  – кількість взаємодіючих термодинамічних систем, що беруть участь у процесі масообміну,  $n_2$  – кількість стінок, що беруть участь у процесі теплообміну,

$p$ ,  $T$ ,  $V$ ,  $m$  – тиск, температура, об'єм та маса газу у відкритій термодинамічній системі,

$c_v$ ,  $c_{vm}$  – фактична та середня ізохорні питомі теплоємності.

Математична модель на базі рівняння (1) є основою онлайн-ресурса Blitz-PRO [10], який дає можливість моделювати процеси роботи двигунів внутрішнього згоряння. Сервіс має вільний доступ; можливе моделювання як стаціонарного, так і нестаціонарного режимів роботи двигуна.

За допомогою цього ресурсу був промодельований робочий процес двотактного дизельного двигуна MAN B&W та визначені основні властивості робочого процесу (рис. 1).

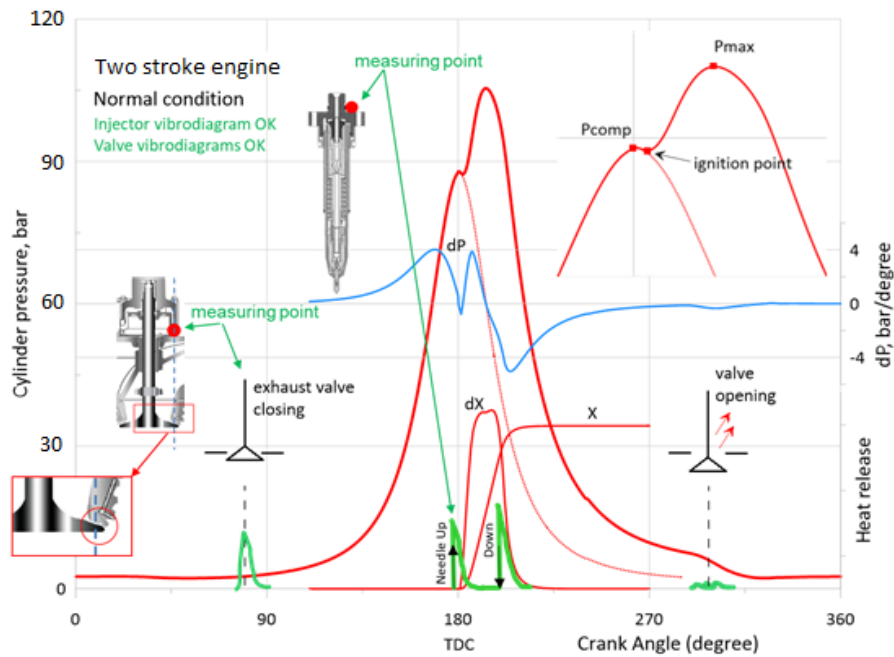


Рисунок 1 – Модель робочого процесу та вібродіаграм форсунки та клапана 2-тактного двигуна

Під час діагностування двигунів на електростанції Mahon був застосований алгоритмічний метод розрахунку та корекції BMT [13] тому, що часу на підготовку до діагностування не було і двигуни, як завжди, знаходилися в стані роботи під навантаженням. Було записано кілька режимів навантаження, та були розраховані індикаторні діаграми з вібродіаграмами форсунки, клапана та паливного насосу високого тиску двигуна MAN B&W 10L67GBES, що є в зовнішній презентації. В тезах наведено приклад 1 циліндру під навантаженням 75% від номінальної потужності (рис. 2). На рис. 2 об'єднано (зверху вниз): індикаторну діаграму тиску газів в циліндрі, вібродіаграми торця форсунки, кришки циліндра та відсічки паливного насосу високого тиску. Згідно юридичним вимогам відносно викидів CO<sub>2</sub> [1] а також вимогам ІМО відносно викидів NO<sub>x</sub> [9] робочий процес двигуна перестроєно на пізню паливоподачу. Завдяки цьому знижені параметри P<sub>max</sub> і T<sub>max</sub>, що значно знижують рівень NO<sub>x</sub> в відпрацьованих газах, - мінімум на 3% нижче вимог ІМО.

Аналіз індикаторних діаграм та вібродіаграм робочих циліндрів дав можливість розрахувати індикаторну потужність двигуна та провести ретельний аналіз його технічного стану.

Висновки. Досвід авторів у діагностуванні морських двигунів показав, що аналіз вібродіаграм паливної апаратури та механізму газорозподілу двигуна, записаних паралельно з індикаторними діаграмами, дає хороші діагностичні результати. За допомогою вібродатчика на магнітній платформі можна визначити:

- фази підйому та посадки голки форсунки;
- початок та кінець циркуляції підігрітого важкого палива у паливній системі;
- фази початку подачі та відсічення палива паливним насосом високого

тиску;

– фази закриття та, у деяких випадках, відкриття клапанів газорозподілу.

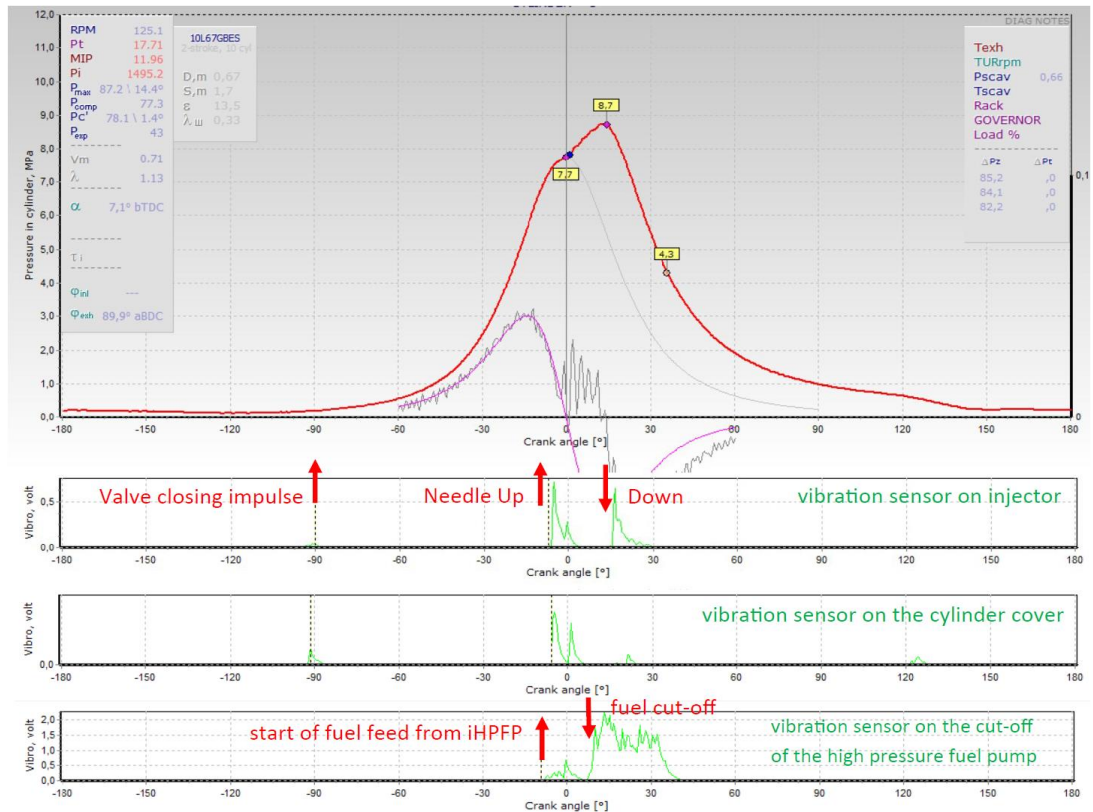


Рисунок 2 – Результат вимірювання робочого процесу та вібродіаграм форсунки, клапана та паливного насосу високого тиску на 2-тактному двигуні MAN B&W 10L67GBES

Можлива також непряма оцінка гідросільності паливної апаратури та тиску впорскування палива. Більше того, така цінна інформація для інженерів, як дійсні фази газорозподілу, раніше була недоступна під час роботи двигуна і визначалася тільки на зупиненому двигуні шляхом низки тривалих маніпуляцій. Крім того, точність визначення фаз газорозподілу залежала від кваліфікації інженера і часто мала суб'єктивний характер.

Така інформація може бути отримана безпосередньо під час експлуатації за допомогою аналізу вібродіаграм. Розглянутий спосіб отримання інформації доступний та зручний у процесі експлуатації. Поряд з алгоритмічним методом розрахунку та корекції ВМТ, який застосовується в переносних діагностичних системах, аналіз вібродіаграм паралельно з індикаторними діаграмами  $P(\text{CA}, \text{deg})$  дозволяє отримати таку інформацію, яка раніше була доступна тільки в лабораторних умовах.

Аналіз індикаторних потужностей циліндрів та параметрів робочих процесів дозволив інженерам електростанції Mahon провести налаштування фаз паливоподачі та газорозподілу таким чином, щоб досягти максимальної індикаторної потужності та економічності робочого процесу водночас не перевищуючи допустимий рівень  $\text{NO}_x$ .

## Література

1. Mahon central power station and health. – Available from: <https://english.gobmenorca.com/mahon-central-power-station-and-health/>
2. Heywood JB. Internal combustion engine fundamentals. New York: McGraw-Hill. 1988.
3. Neumann S. High temperature pressure sensor based on thin film strain gauges on stainless steel for continuous cylinder pressure control. CIMAC Congress. Hamburg. Digest. 2001: 1-12.
4. Neumann S, Varbanets R, Kyrylash O, Yeryganov OV, Maulevych VO. Marine diesels working cycle monitoring on the base of IMES GmbH pressure sensors data. *Diagnostyka*. 2019;20(2):19-26. <https://doi.org/10.29354/diag/104516>.
5. Varbanets RA. Diagnostic control of the working process of marine diesel engines in operation. Dissertation of the Doctor of Technical Sciences. Odessa, 2010.
6. Varbanets R, Fomin O, Pištěk V, Klymenko V, Minchev D, Khrulev A, et al. Acoustic Method for Estimation of Marine Low-Speed Engine Turbocharger Parameters. *Journal of Marine Science and Engineering* [Internet]. 2021 Mar 14; 9(3): 321. Available from: <http://dx.doi.org/10.3390/jmse9030321>
7. Varbanets, R., Karianskiy, A. Analyse of marine diesel engine performance. *Journal of Polish CIMAC. Energetic Aspects*, Gdansk, Faculty of Ocean Engineering and Ship Technology Gdansk University of Technology, 2012, Vol. 7, No. 1, pp. 269-275.
8. Varbanets R, Karianskiy S, Rudenko S, ... Improvement of diagnosing methods of the diesel engine functioning under operating conditions. SAE Technical Paper 2017-01-2218, 2017.
9. IMO (2020), International Convention for the Safety of Life At Sea, part B. Prevention of fire and explosion, paragraph 2.2.5.2. SOLAS Consolidated Edition 2020. London: International Maritime Organization.
10. Minchev D, Varbanets R, Aleksandrovska N. and Pisintsaly L. Marine Diesel Engines Operating Cycle Simulation for Diagnostics Issues. *Acta Polytechnica*, 3(61):428–440, 2021 Aug 7. Available from: <http://dx.doi.org/10.14311/AP.2021.61.0435>.
11. Blitz-PRO by D. S. Minchev. User's manual. – Available from: <http://blitzpro.zeddmalam.com/extra/Tutorial/Help.pdf>
12. D. S. Minchev, R. A. Varbanets. Centrifugal compressor performance maps treatment for internal combustion engines operating cycle simulation. *Internal combustion engines 1'2021*. Doi: 10.20998/0419-8719.2021.1.02
13. Varbanets, R. A., Zalozh, V. I., Shakhov, A. V., Savelieva, I. V., and Piterska, V. M. (2020). Determination of top dead centre location based on the marine diesel engine indicator diagram analysis. *Diagnostyka*, 21(1), pp.51-60. <https://doi.org/10.29354/diag/116585>.