

*Д-р техн. наук Варбанець Р. А.
Кандидати техн. наук Мальчевський В. П.,
Кучеренко Ю. М., Мінчев Д. С., Кирнац В. І.
Аспирант Бондаренко В. І.*

ДІАГНОСТИКА РОБОЧОГО ПРОЦЕСУ ДВОТАКТНИХ ДВИГУНІВ MAN B&W

Ключові слова: дизелі, робочий процес, моделювання, діагностика, паливна апаратура, клапани газорозподілу.

Вступ

Використання двигунів із двотактним принципом дії на тепловозах в АТ «Укрзалізниця» стимулює розвиток сучасних методів контролю їхнього робочого процесу. Насамперед йдеться про неруйнівні методи контролю в умовах скороченого часу під час реостатних випробовувань двигунів.

Використання досвіду діагностики робочого процесу морських та стаціонарних двотактних двигунів, широко поширених на морському флоті, безсумнівно буде корисно і може бути з успіхом застосовано для тепловозних двигунів, оскільки багато завдань і проблем експлуатації двигунів на транспортних засобах є спільними для морських і тепловозних двигунів. Насамперед це робота на нестационарних режимах, для яких актуальне застосування аналітичних методів синхронізації даних в альтернативу апаратним методам, а також методів вібродіагностики.

Зміна температури палива також впливає на робочий процес. Ряд параметрів робочого процесу таких, як якість сумішеутворення, затримка самозаймання та характеристики згоряння в циліндрах, залежать від стабільної роботи системи паливopідготовки та насамперед від роботи системи стабілізації температури на вході в паливні насоси високого тиску.

Метою дослідження є аналіз технічного стану та виявлення дефектів основних вузлів та агрегатів двотактних дизелів за допомогою методів комплексної параметричної діагностики робочого процесу двигуна. Застосування сучасних методів синхронізації даних та вібродіагностики розширює можливості діагностики двигунів. Використовуючи існуючі методи, неможливо здійснювати під час експлуатації прямі вимірювання тиску впорскування палива, фаз подачі та газорозподілу двигунів за допомогою переносних діагностичних систем. Альтернативою прямим вимірюванням є аналіз вібродіаграм за допомогою якого можна визначити фази підйому та посадки голки форсунки, початку подачі та відсікання палива паливним насосом високого тиску, початок та кінець циркуляції підігрітого важкого палива в паливній системі, а також фази закриття та, у деяких випадках, відкриття клапанів газорозподілу і клапанів установки контролю температури палива.

Параметрична діагностика робочого процесу двотактних дизелів

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

Деякі параметри робочого процесу, такі як якість сумішеутворення, затримка самозаймання та характеристика згоряння в циліндрах дизеля залежить від температури палива перед паливним насосом високого тиску (ПНВТ), яка регулюється певною системою контролю. Вчасне виявлення

дефектів окремих вузлів системи контролю температури палива, таких як компресори холодильних установок, дозволить уникнути багатьох аварійних ситуацій, пов'язаних із наслідками раптового збільшення або зменшення температур палива перед ПНВТ.

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 проводити 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 кріплення [5 – 8].

Деякі дефекти можуть бути виявлені шляхом аналізу індикаторних діаграм і їх форми на ділянках стиснення та згоряння, а також шляхом аналізу основних параметрів робочого процесу (табл. 1) [2]. Однак, існує також думка, що аналіз одних тільки індикаторних діаграм $P(CA, deg)$ не достатній для точної діагностики двигуна внутрішнього згорання [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 (ignitionpoints), 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.

Табл.1– Параметри робочого процесу дизеля, що визначаються в експлуатації

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

При аналізі одного з найбільш характерних дефектів циліндро-поршневої групи дизеля - 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_{comp} і за ним P_{max} і MIP . Таким чином, справжня причина дефекту може бути нез'ясованою.

Основними показниками роботи циліндрів двигуна, 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 необхідні для аналізу, під час експлуатації є переважною.

За допомогою математичного моделювання ми розглянули наслідки можливих несправностей суднових 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 надає прогнози, які корисні для вчасного виявлення різних несправностей двигуна на практиці.

Створена математична модель базується на квазістаціонарних та одновимірних нестационарних 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 у циліндрі двигуна. 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;
 $dm_{fuel}/d\phi$, $dm_j/d\phi$ – масова витрата палива і масова 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-ресурсу Blitz-PRO [10], який дає можливість моделювати процеси роботи двигунів внутрішнього згоряння. Цей сервіс має вільний доступ та надає можливість моделювання як стаціонарного, так і нестационарного режимів роботи двигуна. За допомогою цього ресурсу був промодельований робочий процес двотактного дизельного двигуна MAN B&W та визначені основні властивості його робочого процесу (рис.1).

Під час діагностування двигунів на електростанції Mahon був застосований алгоритмічний метод розрахунку та корекції ВМТ поршня у циліндрі [13], тому що часу на підготовку до діагностування двигунів не було і вони, 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&W10L67GBES. На рисунку 2 наведено діаграми для першого циліндру двигуна під навантаженням 75 % від номінальної потужності. На цьому рисунку об'єднано (зверху вниз): індикаторну діаграму тиску газів в циліндрі, вібродіаграми торцю форсунки, кришки циліндра та відсічки паливного насосу високого тиску. Згідно юридичним вимогам Іспанії відносно викидів CO₂ [1], а також вимогам ІМО відносно викидів NOx [9], робочий процес двигуна перебудовано на пізню паливотподачу. Завдяки цьому знижені параметри P_{max} і T_{max} , що значно знижують рівень NOx в відпрацьованих газах - мінімум на 3 % нижче вимог ІМО.

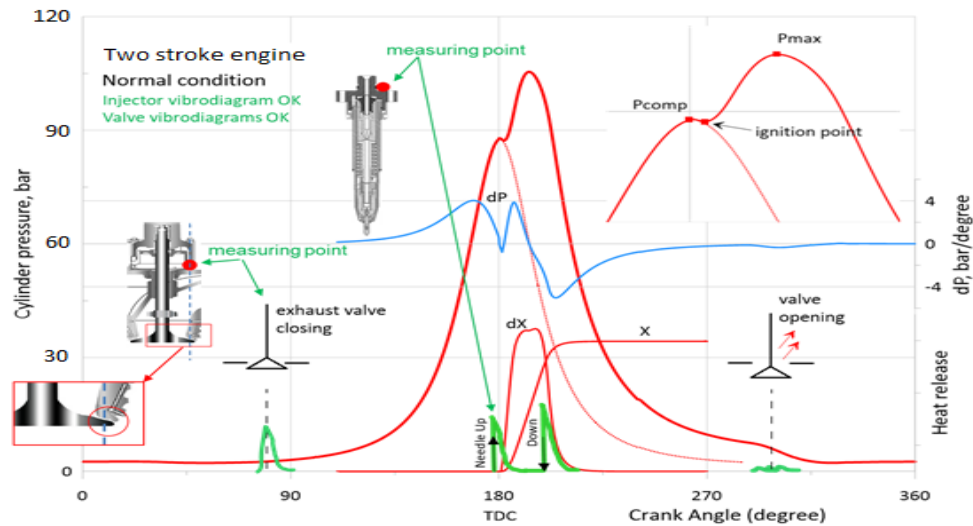


Рис. 1 – Модель робочого процесу та вібродіаграм форсунки і клапана двотактного двигуна

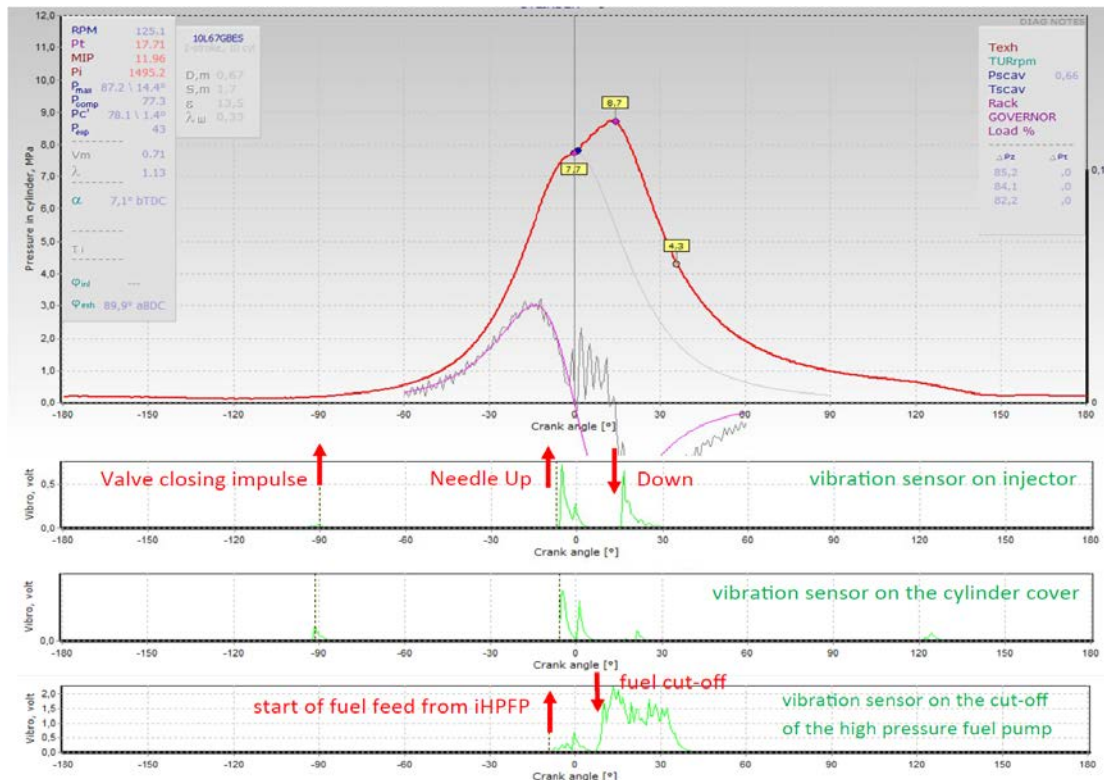


Рис.2 – Результати вимірювання показників робочого процесу та вібродіаграм форсунки, клапана і паливного насосу високого тиску на двотактному двигуні MAN B&W10L67GBES

Проведений аналіз індикаторних діаграм та вібродіаграм робочих циліндрів дав можливість розрахувати індикаторну потужність двигуна внутрішнього згорання та виконати ретельний аналіз його технічного стану.

Висновки

Досвід авторів у діагностуванні морських та тепловозних двигунів показав, що аналіз вібродіаграм паливної апаратури, механізму газорозподілу двигуна, впускних та випускних клапанів, компресору холодильної установки, системи стабілізації температури палива, записаних паралельно з індикаторними діаграмами, дає хороші діагностичні результати. За допомогою встановлення 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;
- частоти та амплітуди коливань при роботі впускних та випускних клапанів компресора холодильної установки.

Можлива також непряма оцінка гідросльнності паливної апаратури та тиску впорскування палива. Більше того, така цінна інформація для інженерів, як дійсні фази газорозподілу поршневих компресорів та двигунів, раніше була недоступна для діагностування 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.

Під час експлуатації така інформація може бути отримана безпосередньо за допомогою аналізу вібродіаграм. Розглянутий спосіб отримання інформації доступний та зручний у процесі експлуатації двигуна або компресора холодильної установки. Поряд з алгоритмічним методом розрахунку та корекції положення ВМТ поршня у циліндрі, який застосовується в переносних діагностичних системах, аналіз вібродіаграм паралельно з індикаторними діаграмами $P(CA, deg)$ дозволяє отримати таку інформацію, яка раніше була доступна тільки в лабораторних умовах.

Аналіз індикаторних потужностей циліндрів та параметрів робочих процесів дозволив інженерам електростанції Mahon (Іспанія) провести налаштування фаз паливоподачі та газорозподілу двигуна таким чином, щоб досягти максимальної його індикаторної потужності та економічності робочого процесу, не перевищуючи допустимий рівень NOx у відпрацьованих газах.

Література

1. Mahon central power station and health. – Available from: <https://english.gobmenorca.com/mahon-central-power-station-and-health/>.
2. Heywood J. 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 [Текст] / S. Neumann // CIMAC Congress. Digest. – Hamburg, 2001. – pp. 1–12.
4. Neumann S. Marine diesels working cycle monitoring on the base of IMES GmbH pressure sensors data [Текст] / S. Neumann, R. Varbanets, O. Kyrylash, O. Yeryganov, V. Maulevych // Diagnostyka, 2019. – Vol. 20, No. 2, p.p. 19–26. - Available from <https://doi.org/10.29354/diag/104516>.
5. Varbanets R. Diagnostic control of the working process of marine diesel engines in operation: dissertation of the Doctor of Technical Sciences: specialty 05.05.03 / Varbanets Roman Anatoljevich. – Odessa, 2010.
6. Varbanets R. Acoustic Method for Estimation of Marine Low-Speed Engine Turbocharger Parameters [Internet] / R. Varbanets, O. Fomin, V. Pištěk, V. Klymenko, D. Minchev, A. Khrulev et al. // Journal of Marine Science and Engineering, 2021. – Vol. 9(3), No. 321, p. 1-12. - Available from: <http://dx.doi.org/10.3390/jmse9030321>.
7. Varbanets R. Analyze of marine diesel engine performance [Text] / R. Varbanets, A. Karianskiy // 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. Improvement of diagnosing methods of the diesel engine functioning under operating conditions [Text] / R. Varbanets, S. Karianskiyi, S. Rudenko at al. // 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. Marine Diesel Engines Operating Cycle Simulation for Diagnostics Issues [Text] / D. Minchev, R. Varbanets, N. Aleksandrovskaia and L. Pisintsaly // ActaPolytechnica, 2021, Vol. 3, No. 61, p.p. 428–440. - 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://blitz.pro.zeddmalam.com/extra/Tutorial/Help.pdf>.

12. Minchev D. Centrifugal compressor performance maps treatment for internal combustion engines operating cycle simulation [Text] / D. Minchev, R. Varbanets // Internal combustion engines, 2021, No. 1, p.p. 9-15. Doi: 10.20998/0419-8719.2021.1.02.

13. Varbanets R. Determination of top dead centre location based on the marine diesel engine indicator diagram analysis [Text] / R. Varbanets, V. Zalozh, A. Shakhov, I. Savelieva and V. Pitera // Diagnostyka, 2020, Vol. 21, No. 1, pp.51-60. – Available from <https://doi.org/10.29354/diag/116585>.

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

Варбанець Роман Анатолійович,

д.т.н., професор, завідувач кафедри суднових енергетичних установок і технічної експлуатації (СЕУ і ТЕ), науковий керівник лабораторії "Моніторинг СДВС" Одеського національного морського університету (ОНМУ), консультант з математики IMES GmbH.

Вул. Мечникова, 34, м. Одеса, 65029, Україна.

Тел.: +38 050 658 54 93.

E-mail: roman.varbanets@gmail.com.

<http://orcid.org/0000-0001-6730-0380>.

Мальчевський Валентин Павлович,

к.т.н., доцент, доцент кафедри СЕУ та ТЕ ОНМУ.

Вул. Мечникова, 34, м. Одеса, 65029, Україна.

Тел.: +38 050 924 87 61.

E-mail: valentinmalchevsky@gmail.com.

<https://orcid.org/0000-0003-3117-1251>.

Кучеренко Юрій Миколайович,

к.т.н., доцент, доцент кафедри СЕУ та ТЕ ОНМУ.

Вул. Мечникова, 34, м. Одеса, 65029, Україна.

Тел.: +38 0482 728 31 19.

E-mail: kucherenko.iurii@gmail.com.

Мінчев Дмитро Степанович,

к.т.н., доцент, доцент кафедри СЕУ та ТЕ ОНМУ.

Вул. Мечникова, 34, м. Одеса, 65029, Україна.

Тел.: +38 0482 728 31 19.

E-mail: misaidima@gmail.com.

<http://orcid.org/0000-0002-5960-3063>.

Кирнац Владислав Іванович,

к.т.н., доцент, доцент кафедри СЕУ та ТЕ ОНМУ.

Вул. Мечникова, 34, м. Одеса, 65029, Україна.

Тел.: +38 0482 728 31 19.

E-mail: kirnacsvlad@gmail.com.

Бондаренко Вячеслав Володимирович,

аспірант кафедри СЕУ та ТЕ ОНМУ.

Вул. Мечникова, 34, м. Одеса, 65029, Україна.

Тел.: +38 0482 728 31 19.

E-mail: kirnacsvlad@gmail.com.