

УДК 629.5.03:621.436.13.03

doi: 10.32620/aktt.2022.4sup.2.14

Р. А. ВАРБАНЕЦЬ¹, В. П. МАЛЬЧЕВСЬКИЙ¹, Д. С. МІНЧЕВ², В. І. ЗАЛОЖ³,
В. І. КИРНАЦЬ¹, Н. І. АЛЕКСАНДРОВСЬКА¹

¹ Одеський Національний Морський Університет, Одеса, Україна

² Національний університет кораблебудування ім. адм. Макарова, Миколаїв, Україна

³ Дунайський інститут Національного університету
«Одеська морська академія», Ізмаїл, Україна

ДІАГНОСТИКА ПАЛИВНОЇ АПАРАТУРИ, ПРИВОДУ КЛАПАНІВ ГАЗОРОЗПОДІЛУ ТА ФОРСУНОК ЗМАЩЕННЯ ЦИЛІНДРІВ СУЧАСНИХ ДВОТАКТНИХ ДВИГУНІВ

Застосування вібродатчика разом з датчиком тиску газів у робочому циліндрі розширює можливості діагностики двигунів та компресорів у різних сферах експлуатації: морських дизелів, поршневих компресорів холодильних установок та авіаційних двигунів при їх випробуваннях на спеціальних стендах. Відомо, що експлуатаційні дефекти паливної апаратури високого тиску та механізму газорозподілу виявляються на індикаторних діаграмах $P(V)$, $P(deg)$ робочих циліндрів, змінюючи їх форму та значення основних параметрів робочого процесу: максимального тиску згоряння P_{max} , тиску кінця стиснення P_{comp} , середнього індикаторного тиску $IMEP$ та інших. Однак відомо також, що деякі дефекти можуть мати однаковий вплив. Наприклад, пізній кут впорскування та знос паливної апаратури практично однаково спотворює індикаторну діаграму та значення параметрів. Причиною зниження компресії в циліндрах та зниження P_{comp} можуть бути як знос втулки або поломка кілець, так і нещільність закриття або дефект клапанів газорозподілу. У багатьох випадках вплив дефектів може бути не явним. Існує також велика кількість некритичних дефектів або дефектів на ранніх стадіях, які практично не змінюють основні параметри та форму індикаторних діаграм. Пряме безпосереднє вимірювання тиску впорскування або ходу голки форсунки, а також діаграм переміщення клапанів газорозподілу, як це робиться в умовах дизельної лабораторії морського університету, дозволило б точно визначити та усунути дефекти. Однак, під час експлуатації неможливо проводити безпосередні вимірювання тиску впорскування палива, фаз паливоподачі та газорозподілу морських двигунів, використовуючи існуючі методи, які реалізовані в переносних діагностичних системах. Альтернативою прямим вимірам є застосування вібродатчика. За допомогою вібродатчика на магнітній платформі можна визначити фази підйому та посадки голки форсунки, початку подачі та відсікання палива паливним насосом високого тиску, початок та кінець циркуляції підігрітого важкого палива у паливній системі, фази закриття та, в деяких випадках, відкриття клапанів газорозподілу, частоту та амплітуду коливань при роботі впускних та випускних клапанів поршневого компресора холодильних установок, а також фазу та характер упорскування циліндрового масла. Така інформація може бути отримана безпосередньо під час експлуатації або випробування двигунів та компресорів за допомогою магнітного вібродатчика, що входить до складу сучасних діагностичних систем.

Ключові слова: діагностика паливної апаратури; морський дизельний двигун; компресор; газорозподіл; форсунки змащення циліндрів.

Вступ

В авіації, на морі та на інших видах транспорту безаварійну роботу двигунів та компресорів можна забезпечити шляхом регулярного контролю параметрів робочого процесу в окремих циліндрах. 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. На морі контроль робочого процесу дозволяє здійснювати регулювання двигунів так, щоб забезпечити

низький рівень емісії шкідливих викидів, насамперед NO_x , відповідно до вимог ІМО [1].

Періодичний контроль дозволяє виявити дефекти циліндрів, що зароджуються під час експлуатації і обслуговуючих двигун систем. Деякі дефекти можуть бути виявлені шляхом аналізу індикаторних діаграм $P(^{\circ}CA)$, аналізу їхньої форми на ділянках стиснення і згоряння, а також аналізу основних параметрів робочого процесу (P_{max} , P_{comp} , MIP , ignition points та інших) [2, 10]. Прикладами таких дефектів є зниження MIP , P_{max} або тиску кінця стиснення P_{comp} .

При аналізі одного з найбільш характерних дефектів ЦПГ – зниження компресії в робочому циліндрі і як наслідок P_{comp} – існує неоднозначність при аналізі одних лише індикаторних діаграм. Зменшення величини P_{comp} може бути викликано декількома причинами: зносом втулки циліндра, зносом та/або залипанням поршневих кілець, нещільністю закриття клапанів або *valves timing malfunction*. Всі ці фактори спричиняють один наслідок – зниження параметра P_{comp} і потім P_{max} та MIP [2]. Таким чином, справжня причина дефекту може залишитись нез'ясованою.

Крім дефекту зниження компресії, деякі інші експлуатаційні дефекти, що виявляються на індикаторних діаграмах, можуть бути викликані різними причинами. В першу чергу це дефекти паливної апаратури високого тиску та дефекти механізму керування клапанами газорозподілу. Необхідно підкреслити, що саме ці дефекти найчастіше виникають у процесі експлуатації морських двигунів. Особливо це стосується дефектів паливної апаратури високого тиску. Наприклад, пізнє згоряння палива в циліндрі, виявлене шляхом аналізу *ignition points* на індикаторних діаграмах $P(^{\circ}CA)$, також може бути наслідком декількох причин: пізнього кута впорскування палива та/або зносу прецизійних вузлів паливної апаратури високого тиску та зниження тиску палива перед форсунками під час впорскування. Тому виявити окремі експлуатаційні дефекти за допомогою одного лише аналізу індикаторних діаграм досить складно. Також на ряд показників робочого процесу двигуна, серед яких затримка самозаймання та деякі характеристики згоряння палива у циліндрі двигуна впливає температура палива перед паливним насосом високого тиску (ПНВТ), що регулюється системою стабілізації температури палива. Основним вузлом цієї системи є компресор холодильної установки, що підтримує необхідну температуру охолоджувальної води. Своєчасне виявлення несправностей клапанів компресорів систем стабілізації температури палива, що проявляються досить часто, дозволяє уникнути багатьох аварійних ситуацій у роботі дизелів, пов'язаних із раптовою зміною температури палива.

Безпосередні вимірювання та аналіз діаграм тиску впорскування палива перед форсунками могли б дати повну діагностичну інформацію про технічний стан паливної системи високого тиску. Однак такі вимірювання неможливо проводити за допомогою переносних пристроїв в умовах експлуатації. Це пов'язано з високим ризиком виникнення пожежі при протіканні палива у місцях встановлення датчиків в системі високого тиску. Тому такі вимірювання обмежені сучасними вимогами ІМО та більшістю морських сертифікаційних суспільств [1, 5].

Альтернативою прямим вимірам є застосування вібродатчиків на магнітній платформі [5-8]. Такі датчики повністю відповідають сучасній стратегії неруйнівного контролю параметрів при діагностуванні морських двигунів. Магнітні вібродатчики можуть бути швидко встановлені на обране місце, що скорочує загальний час вимірів і дає можливість витримати умови псевдостационарного режиму навантаження під час діагностування двигунів. Вібродіаграми та індикаторні діаграми $P(^{\circ}CA)$ записуються одночасно та аналізуються паралельно. Такий паралельний аналіз дозволяє з'ясувати точну причину дефекту чи уточнити її. Особливо чутливим запропонований метод виявився для аналізу дефектів паливної апаратури високого тиску (*injectors*, *HPFP*), клапанів газорозподілу, а також впускних та випускних клапанів компресорів холодильних установок. Використання магнітних вібродатчиків для контролю роботи паливної апаратури високого тиску та клапанів дають цінну інформацію про технічний стан основних вузлів, таймінгу паливоподачі та таймінгу газорозподілу двигунів.

Метою даної роботи є представлення технології діагностики паливної апаратури, роботи форсунки, приводу клапанів газорозподілу та форсунок змащення циліндрів сучасних двотактних двигунів за допомогою паралельного аналізу вібродіаграм та індикаторної діаграми.

1. Параметри робочого процесу, які визначаються під час експлуатації

Параметри робочого процесу, які визначаються під час експлуатації, наведені в таблиці 1. Під час діагностування циліндра датчик тиску встановлюється на індикаторний кран, після його продування. Вібродатчик послідовно встановлюється на зазначені точки (рис. 1): торець форсунки, відсічка паливного насоса високого тиску та кришка циліндра (за необхідністю). Кожного разу виконується запис індикаторної діаграми та вібродіаграми. Далі, при аналізі даних зіставляються вібродіаграми і таким чином можуть бути визначені затримка самозаймання палива та різниця геометричних та дійсних фаз паливоподачі (*DeltaG*), що дає цінну діагностичну інформацію про протікання палива та якість сумішоутворення в робочому циліндрі.

2. Моделювання робочого процесу суднового двигуна MAN 6S60MC-C за допомогою онлайн-сервісу Blitz-PRO

За допомогою математичного моделювання були розглянуті можливі несправності суднових дизельних двигунів. Математичне моделювання дає

Таблиця 1

Параметри робочого процесу, які визначаються під час експлуатації системою EPM-XPplus Engine Analyser [3]

Pmax (Pz)	Максимальний тиск згоряння та відповідний кут колінчастого валу, Bar/ °CA
Pcomp	Тиск кінця стиснення, Bar
IMEP (MIP)	Середній індикаторний тиск, Bar
IPOWER	Індикаторна потужність циліндра, kW
Pignition	Тиск початку згоряння та відповідний кут колінчастого валу, Bar/ °CA
Pexp (P36)	Тиск при 36° KB після ВМТ
Fuel Injection Timing	Реальні та геометричні фази впорскування палива, °CA
Valves Timing	Фази газорозподілу впускних і випускних клапанів, °CA
Fuel Ignition Delay	Час від початку впорскування до початку згоряння, °CA/ms
DeltaG	Різниця між реальною та геометричною фазами впорскування палива, °CA

можливість уточнити вплив заданих параметрів, а також прогнозувати виявлення різних несправностей на практиці.

Для моделювання робочих процесів двигунів внутрішнього згоряння був використаний онлайн-сервіс моделювання Blitz-PRO [9, 10], який дає можливість моделювати процеси роботи двигунів внутрішнього згоряння. Сервіс має вільний доступ; можливе моделювання як стаціонарного, так і нестійких режимів роботи двигуна.

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

$$\begin{aligned}
 & \left(\frac{dI_{\text{fuel}}}{d\phi} + \sum_1^{n_1} \frac{dI_j}{d\phi} \right) + \frac{\delta Q_{\text{comb}}}{d\phi} + \sum_1^{n_2} \frac{\delta Q_{\text{walli}}}{d\phi} = \\
 & = c_{vm} T \left(\sum_1^{n_1} \frac{dm_j}{d\phi} + \frac{dm_{\text{fuel}}}{d\phi} \right) + c_{vm} m \frac{dT}{d\phi} + \\
 & + mT \frac{d(c_v)_T}{d\phi} + p \frac{dV}{d\phi}
 \end{aligned} \quad (1)$$

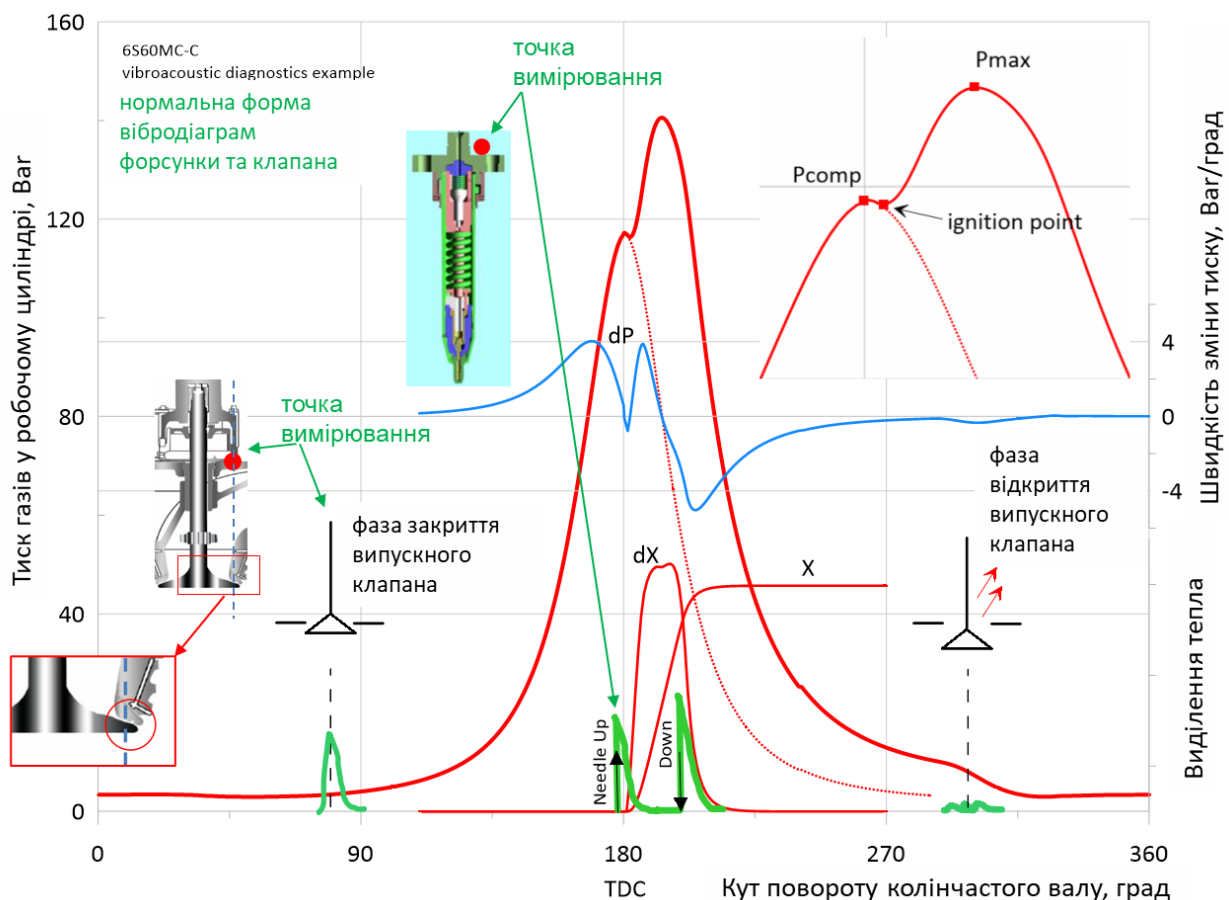


Рис. 1. Вібродіаграми форсунки та випускного клапана в поєднанні з індикаторною діаграмою

де $dI_{\text{fuel}}/d\varphi$, $dI_j/d\varphi$ – швидкість зміни ентальпії за рахунок випаровування палива і процесу масообміну,

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

$\delta Q_{\text{walli}}/d\varphi$ – швидкість теплопередачі до стінок системи,

$dm_{\text{fuel}}/d\varphi$, $dm_j/d\varphi$ – масова витрата палива та масова витрата газів,

n_1 – кількість взаємодіючих термодинамічних систем, що беруть участь у процесі масообміну,

n_2 – кількість стінок, які беруть участь у процесі теплообміну,

p , T , V , m – тиск, температура, об'єм, маса газової суміші,

c_v , c_{vm} – фактична та середня ізохорна питома теплоємність.

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

$$dm = \sum_1^{n_1} dm_j + dm_{\text{fuel}}; pV = Z \frac{m}{\mu} RT, \quad (2)$$

де Z – коефіцієнт стиснення, розрахований за рівнянням Берто:

$$Z = 1 + \frac{9}{128} \frac{\pi}{\theta} \left(1 - \frac{6}{\theta^2} \right), \quad (3)$$

де $\pi = p/p_{\text{crit}}$, $\theta = T/T_{\text{crit}}$ відносно критичного тиску і температури.

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

Одною з важливих характеристик математичної моделі є можливість використання карт ефективності турбокомпресора з прогнозуванням можливої нестабільної роботи компресора [12], що дозволяє правильно оцінити різні робочі параметри двигуна або вплив несправностей на експлуатаційні процеси і ефективність роботи двигуна.

3. Вібродіаграма форсунки та випускного клапана. Нормальний технічний стан

Індикаторна діаграма та вібродіаграма форсунки та клапана, що відповідають нормальному технічному стану двигуна для режиму MCR, показані на рис. 1. Індикаторна діаграма $P(^{\circ}\text{CA})$ записується за допомогою датчика тиску (НТТ pressure sensor),

встановленого на індикаторний кран за допомогою Thomson adapter [5].

Для вимірювання та аналізу діаграм впорскування палива необхідно встановити магнітний вібродатчик на вільну частину торця форсунки. Для отримання вібродіаграми закриття клапана точка установки вібродатчика – на кришці циліндра приблизно напроти місця контакту тарілки клапану з кришкою, як показано на рис. 1.

Випробування на двотактних дизелях показали, що в більшості випадків з торця форсунки може бути записана вібродіаграма закриття клапана [5], тому часто достатньо використовувати тільки цю одну точку установки – торець форсунки. В результаті змін з двох датчиків та подальшого розрахунку ВМТ [4, 5, 7, 8] інженер отримує записані одночасно індикаторну діаграму $P(^{\circ}\text{CA})$ – (див. рис.1) red line та оброблену вібродіаграму форсунки та випускного клапану – green line. Обидві діаграми і поєднані по кутку повороту колінчастого валу.

Високий тиск палива під час впорскування створює зусилля, що перевищує силу затягнутої пружини голки форсунки, голка піднімається вгору, ударяючись об верхній упор. Внаслідок цього удару вібродатчик фіксує імпульс з характерними загасаючими коливаннями (див. рис.1). Після амплітудної демодуляції вібросигналу отримуємо перший імпульс, що відповідає підйому голки форсунки (Needle Up). Наприкінці впорскування, після відсічки та припинення подачі палива з боку паливного насоса високого тиску, тиск перед форсункою падає, і пружина повертає голку на місце. Удар голки в посадкове місце розпилювача форсунки створює другий віброімпульс (Needle Down). Необхідно зазначити, що передні фронти віброімпульсів відповідають повному підйому і повній посадці голки. При цьому впорскування палива в циліндр починається трохи раніше, в момент початку підйому голки. Фазова тривалість підйому голки варіюється для різних типів двигунів і становить менше 0.3° колінчастого валу для більшості морських двотактних двигунів, протягом якої в циліндр впорскується менше 3% від циклової порції палива [2,5]. Таким чином, фазу моменту повного підйому голки та удару її об верхній упор (Needle Up на рис.1) можна вважати фазу дійсного кута впорскування палива в циліндр двигуна.

В трубопроводі високого тиску циркулює нагріте паливо. Таке рішення передбачено розробниками великих двотактних двигунів MAN для того, щоб унеможливити застій та утворення згустків у паливній системі. Циркуляція нагрітого палива відбувається весь час, поки немає впорскування. Безпосередньо перед впорскуванням циркуляція палива припиняється і потім починається знову, після впор-

скування палива в циліндр. За допомогою запропонованої технології віброакустичного аналізу процесів, що відбуваються в паливній системі високого тиску, є можливість контролювати як фази впорскування палива, так і фази його циркуляції.

Принцип циркуляції палива у паливній системі такий. Поки тиск у паливній системі високого тиску нижче приблизно 10 бар, в системі циркулює нагріте паливо. Потім, коли тиск від паливного насоса високого тиску збільшується і стає більшим 10 бар, пружина клапана циркуляції стискається і клапан перекриває циркуляцію палива. Паливо починає надходити і натискати на диференціальний майданчик голки форсунки. Потім при високому тиску палива (30-50 МПа залежно від типу двигуна) стискається основна пружина форсунки, голка піднімається і починається впорскування палива в камеру згоряння. Потім, коли тиск в системі падає після відключення подачі палива, основна пружина повертає голку на місце і впорскування палива припиняється. Тиск у паливній системі падає і коли він зменшується менше 10 бар, знову відкривається циркуляційний клапан і починається циркуляція палива до наступного робочого циклу.

За допомогою запропонованої технології можна відслідковувати всі 4 фази роботи форсунки:

- імпульс «stop fuel circulation» - закриття циркуляційного клапана та припинення циркуляції, впорскування ще немає;
- імпульс «needle up» - підйом голки паливної форсунки та початок впорскування палива в камеру згоряння;
- імпульс «needle down» - посадка голки форсунки та закінчення впорскування палива;
- імпульс «start fuel circulation» - відкриття циркуляційного клапана і початок циркуляції палива до наступного робочого циклу.

Але, безумовно, це хороша діагностична інформація для кожної з паливних форсунок, яких на великому двотактному двигуні в 2 або 3 рази більше, ніж циліндрів (наприклад, 12 шт. на 6-ти циліндровому двигуні типу 6S60MC/ME). Імовірність виходу з ладу або дефекту на одній або кількох їх досить велика і це матиме негативний наслідок на весь двигун в цілому.

Запропонована технологія дозволяє детально контролювати роботу кожної паливної форсунки та вчасно виявляти дефекти, що виникають в процесі експлуатації.

Аналіз імпульсів, що відповідають повному закриттю випускних клапанів також дає хорошу діагностичну інформацію про технічний стан систем управління клапанами кожного циліндра. Повне закриття випускного клапана відбувається в кінці його ходу після дії гідравлічного демпфера, який

пом'якшує удари тарілки клапана в посадочне місце на кришці циліндра. Демпфер трохи затягує фазу закриття і, в результаті контакт тарілки з посадковим місцем відбувається приблизно на 10-12 °CA пізніше фактичного закриття клапана [2, 5]. У зв'язку з цим бачимо віброімпульс закриття клапана на фазі близько 90 °CA, інколи і навіть пізніше (див. рис. 1 exhaust valve closing). Точка установки вібродатчика може бути одна – торець форсунки.

Порівняльний аналіз фаз і форм віброімпульсів закриття клапанів дає хорошу діагностичну інформацію про технічний стан систем управління клапанами та гідравлічних демпферів клапанів всіх циліндрів. Можна зазначити, що раніше інформація про фактичні фази газорозподілу була доступна лише в лабораторних умовах, а за допомогою запропонованої технології така інформація стає доступною безпосередньо під час експлуатації.

4. Вібродіаграма форсунки циліндрового змащування

Задачі системи циліндрового змащування перелічено в порядку їх важливості:

- зменшення тертя між поршневими кільцями та стінкою циліндра;
- нейтралізація кислотних властивостей палива;
- ущільнення між поршневими кільцями та стінкою гільзи циліндра;
- очищення циліндра шляхом видалення продуктів зношування, залишків пального та мастильних матеріалів.

У зв'язку з прагненням судновласників до мінімального зношування втулки, а також у зв'язку з тим, що як Wärtsilä, так і MAN B&W називають корозію основною причиною зносу втулок, зменшенню тертя та нейтралізації кислоти необхідно приділяти першорядну увагу. В системах електронного змащування циліндрів застосовується декілька форсунок по периметру циліндра, див. рис. 2. Впорскування масла відбувається під тиском до 30 бар на такті стиснення після проходження першого кільця і продовжується до нижньої частини поршня [13]. На рис. 2 показана фаза впорскування мастила, яка зареєстрована по вібродіаграмі мастильної форсунки. З урахуванням короткого періоду впорскування (близько 10 °CA) і з урахуванням високої швидкості поршня в цей момент (середня швидкість поршня для супердовгоходових двигунів становить до 9 м/с [2]) стає зрозумілою важливість точної синхронізації фази впорскування мастила та високі вимоги до системи управління. Помилкове впорскування мастила ні до ні після неприпустиме, оскільки приведе або до попадання масла на дно поршня, або до впорскування під поршень, коли він уже прой-

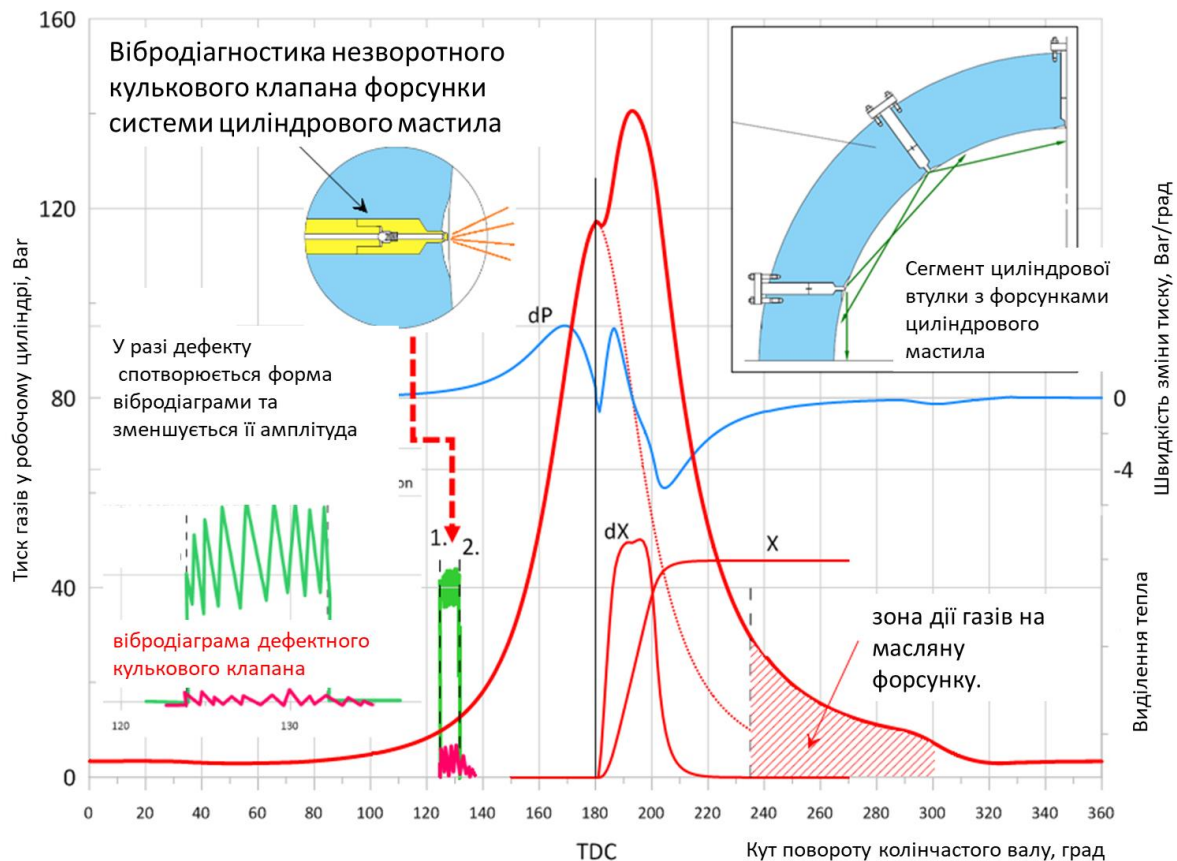


Рис. 2. Вібродіаграма форсунки циліндрового змащування в поєднанні з індикаторною діаграмою

шов вгору. В цих випадках кільця не будуть змащені, а масло згорятиме в циліндрі і утворюватиме тверді відкладення.

Контроль працездатності масляних форсунок та фаз упорскування масла дуже необхідний. За допомогою системи, що розробляється, пропонується віброакустичний контроль кожної з масляних форсунок, які можуть мати кульковий зворотний клапан, який може періодично виходити з ладу і сприяти попаданню газів в маслоподаючу трубку, внаслідок чого така форсунка буде працювати ненормально і не забезпечуватиме необхідні умови змащення в даному секторі поршневих кілець.

Запропонований періодичний віброакустичний контроль працездатності кожної з масляних форсунок забезпечить безаварійну експлуатацію двигуна в складних морських умовах.

Контроль вібродіаграми впорскування масла проводиться аналогічно контролю вібродіаграми паливних форсунок. Характерні форми вібродіаграми для нормального та ненормального впорскування масла показані на рис. 2.

Такий запропонований періодичний контроль вібродіаграм форсунок впорскування циліндрового масла виключить ситуацію експлуатації двигуна з дефектами в системі циліндрового змащування.

Висновки

Досвід авторів у проведенні performance analysis 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, експлуатаційні дефекти форсунки;
- початок та кінець циркуляції палива в паливній системі;
- фази початку подачі та відсічення палива паливним насосом високого тиску;
- фази закриття і, в деяких випадках, відкриття клапанів газорозподілу;
- частоти та амплітуди коливань при роботі впускних та випускних клапанів компресорів холодильних установок;
- фази упорскування масла в системі циліндрового змащування та експлуатаційні дефекти масляної форсунки.

Можлива також опосередкована оцінка гідроскопичності паливної апаратури і тиску впорскування палива. Таку інформацію можна отримати безпосе-

редньо під час експлуатації за допомогою магнітного вібродатчика. Розглянутий спосіб отримання інформації доступний та зручний у процесі експлуатації. Разом з алгоритмічним методом розрахунку та корекції ВМТ, аналіз вібродіаграм паралельно з індикаторними діаграмами $P(\text{CA}, \text{deg})$, дозволяє отримати таку інформацію, яка раніше була доступною тільки в лабораторних умовах.

Література

1. Resolution MEPC.317(74). 2019. Amendments to the technical code on control of emission of nitrogen oxides from marine diesel engines. International Maritime Organization (IMO) [Електронний ресурс]. – 2019. – Режим доступу: [https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.319\(74\).pdf](https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.319(74).pdf) (дата звернення: 28.04.2022)
2. Heywood, J. B. Heywood. Internal combustion engine fundamentals [Text] / J. B. Heywood. – New York : McGraw-Hill, 1988. – 930 p.
3. Neumann, S. High temperature pressure sensor based on thin film strain gauges on stainless steel for continuous cylinder pressure control [Text] / S. Neumann // CIMAC Congress. – Hamburg : Digest, 2001. – P. 1–12.
4. Marine diesels working cycle monitoring on the base of IMES GmbH pressure sensors data / S. Neumann, R. Varbanets, O. Kyrylash et al. // Diagnostyka. – 2019. – No. 20(2). – P. 19–26. DOI: 10.29354/diag/104516.
5. Варбанец, Р. А. Диагностический контроль рабочего процесса судовых дизелей в эксплуатации [Текст] : дис. ... д-ра техн. наук : 05.05.03 / Варбанец Роман Анатольевич ; Одес. национ. морск. акад., 2010. – 314 с.
6. Acoustic method for estimation of marine low-speed engine turbocharger parameters [Text] / R. Varbanets, O. Fomin, V. Pištěk [et al.] // Journal of Marine Science and Engineering. – 2021. – Vol. 9, Iss. 3. – Article No. 321. – 13 p. DOI: 10.3390/jmse9030321.
7. Varbanets, R. Analyse of marine diesel engine performance [Text] / R. Varbanets, A. Karianskiy // Journal of Polish CIMAC. Energetic Aspects. – Gdansk : Faculty of Ocean Engineering and Ship Tech: Gdansk University of Technology, 2012. – P. 269–275.
8. Improvement of diagnosing methods of the diesel engine functioning under operating conditions / R. Varbanets, S. Karianskiy, S. Rudenko, I. Gritsuk [et al.] // SAE Technical Paper. – 2017. – 12 p. DOI: 10.4271/2017-01-2218.
9. Marine diesel engines operating cycle simulation for diagnostics issues / D. Minchev,

R. Varbanets, N. Aleksandrovska, L. Pisintsaly // Acta Polytechnica. – 2021. – Vol. 61, Iss. 3. – P. 428–440. DOI: 10.14311/AP.2021.61.0435.

10. Minchev, D. S. Blitz-PRO User's manual [Електронний ресурс] / D. S. Minchev – Режим доступу: <http://blitzpro.zeddmalam.com/extra/Tutorial/Help.pdf> (дата звернення: 27.04.2022)

11. Determination of top dead centre location based on the marine diesel engine indicator diagram analysis [Text] / R. Varbanets, V. Zalozh, A. Shakhov [et al.] // Diagnostyka. – 2020. – Vol. 21, Iss. 1. – P. 51–60. DOI: 10.29354/diag/116585.

12. Minchev, D. Centrifugal compressor performance maps treatment for internal combustion engines operating cycle simulation [Text] / D. Minchev, R. Varbanets // Internal combustion engines. – 2021. – №1(21). – P. 9–15. DOI:10.20998/0419-719.2021.1.02.

13. Rakopoulos, C. D. Investigation of turbocharged diesel engine operation, exhaust emissions, and combustion noise radiation during starting under cold, warm, and hot conditions [Text] / C. D. Rakopoulos, A. M. Dimaratos, E. G. Giakoumis // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering. – 2011. – Vol. 225, Iss. 9. – P. 1118–1133. DOI: 10.1177/0954407011400155.

References

1. Resolution MEPC.317(74). Amendments to the technical code on control of emission of nitrogen oxides from marine diesel engines. International Maritime Organization (IMO), 2019. 21 p. Available at: [https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.319\(74\).pdf](https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.319(74).pdf) (Accessed 28 April 2022).
2. Heywood, J. B. Internal combustion engine fundamentals. McGraw-Hill, New York, 1988. 930 p.
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, pp. 1-12.
4. Neumann, S., Varbanets, R., Kyrylash, O., Yeryanov, O. V., Maulevych, V. O. Marine diesels working cycle monitoring on the base of IMES GmbH pressure sensors data. Diagnostyka, 2019, no. 20(2), pp. 19-26. DOI: 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. Odessa National Maritime University. Odessa, 2010. 314 p.
6. Varbanets, R., Fomin, O., Pištěk, V., Klymenko, V., Minchev, D., Khrulev, A., Zalozh, V., Kučera, P. Acoustic Method for Estimation of Marine Low-Speed

Engine Turbocharger Parameters. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2021, no. 9(3), article no. 321. 13 p. DOI: 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, vol. 2017. 12 p. DOI: 10.4271/2017-01-2218.

9. Minchev, D., Varbanets, R., Aleksandrovskaya, N., Pisintsaly, L., Marine diesel engines operating cycle simulation for diagnostics issues. *Acta Polytechnica*, 2021, vol. 61, iss. 3, pp. 428-440. DOI: 10.14311/AP.2021.61.0435.

10. Minchev, D. S. *Blitz-PRO User's manual*. 2018. 96 p. Available at: <http://blitzpro.zeddmalam.com/extra/Tutorial/Help.pdf> (Accessed 27.04.2022).

11. Varbanets, R. A., Zalozh, V. I., Shakhov, A. V., Savelieva, I. V., Pitera, V. M. Determination of top dead centre location based on the marine diesel engine indicator diagram analysis. *Diagnostyka*, 2020, vol. 21, iss. 1, pp. 51-60. DOI: 10.29354/diag/116585.

12. Minchev, D., Varbanets, R. Centrifugal compressor performance maps treatment for internal combustion engines operating cycle simulation. *Internal combustion engines*, 2021, no. 1(21), pp. 9-15. DOI: 10.20998/0419-8719.2021.1.02.

13. Rakopoulos, C. D., Dimaratos, A. M. Giakoumis, E. G. Investigation of turbocharged diesel engine operation, exhaust emissions, and combustion noise radiation during starting under cold, warm, and hot conditions. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 2011, vol. 225, iss. 9, pp. 1118-1133. DOI: 10.1177/0954407011400155.

Надійшла до редакції 1.06.2022, розглянута на редколегії 8.08.2022

DIAGNOSTICS OF FUEL EQUIPMENT, GAS-DISTRIBUTION VALVES TRAIN MECHANISM AND CYLINDER LUBRICATION NOZZLES OF MODERN TWO-STROKE ENGINES

Roman Varbanets, Valentyn Malchevskyi, Dmytro Minchev, Vitalii Zalozh, Vladislav Kyrnats, Nadezhda Alexandrovskaya

The application of a vibration sensor with an in-cylinder pressure sensor extends the capabilities of internal combustion engines and compressor diagnostics for various types of plants and installations, such as marine diesel engines, refrigeration piston compressors, aircraft engines. The fuel injection equipment malfunctions as valve as valve train system malfunctions could be detected from the experimental indicated diagrams $P(V)$, $P(deg)$ of the engine cylinder operating process as it is known. The main indicators are the following: the shape of the diagram and the parameters of working cycle – the maximum combustion pressure P_{max} , the compression pressure P_{comp} , mean indicated pressure IMEP, etc. However, it should be considered that different types of malfunctions could have the same reflection on the indicated diagram. For instance, the late fuel injection and the fuel-injection equipment wear could have almost similar effects on the indicated diagram and main diagnostic parameters. Another example is the low compression pressure P_{comp} , which could be caused by the cylinder or compression rings wear and by the exhaust valves wrong timing or valve leakage. It should also be mentioned that many types of malfunctions at their early stages are very difficult to detect and clarify based solely on the indicated diagrams analysis. The detection of such malfunctions usually requires the direct measurements of the fuel injection pressure and injector's needle lift diagrams with accurate valve timing measurements. However, mentioned measurements could be performed under laboratory conditions and are difficult to apply under engine operating conditions. The vibration sensor application could be a reasonable alternative to the direct measurements, as it allows the determination of the injector's needle lift-off and landing timing, high-pressure fuel pump cut-off and discharge timing, the preheated heavy fuel circulation start/stop timing as well as gas-distribution valves opening and closing timing, the oscillation frequency, and amplitude from the refrigeration system piston compressor valve operation and the cylinder oil injector timing. The vibration sensor has a magnetic basement that allows its easy mounting on the engine parts. All this information could be directly measured during engines and compressor trials by the vibration sensor applied in the advanced diagnostic systems.

Keywords: turbocharger diagnostics; marine diesel engine; compressor; gas distribution, cylinder lubrication nozzles.

Варбанець Роман Анатолійович – д-р техн. наук, проф., зав. каф. Суднові енергетичні установки та технічна експлуатація, Одеський Національний Морський Університет, Одеса, Україна.

Мальчевський Валентин Павлович – канд. техн. наук, доц. каф. «Суднові енергетичні установки та технічна експлуатація», Одеський національний морський університет, Одеса, Україна.

Мінчев Дмитро Степанович – канд. техн. наук, доц. каф. двигунів внутрішнього згоряння, установок та технічної експлуатації, Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, Миколаїв, Україна.

Залож Віталій Іванович – канд. техн. наук, доц. каф. інженерних дисциплін, Дунайський інститут Національного університету «Одеська морська академія», Ізмаїл, Україна.

Кирнац Владислав Іванович – канд. техн. наук, доц. каф. «Суднові енергетичні установки та технічна експлуатація», Одеський національний морський університет, Одеса, Україна.

Александровська Надія Ігорівна – канд. техн. наук, доц. каф. «Суднові енергетичні установки та технічна експлуатація», Одеський національний морський університет, Одеса, Україна.

Roman Varbanets – doctor of engineering sciences, full professor, head of department "The Marine Power Plants and Technical Operation", Odesa National Maritime University, Odesa, Ukraine,
e-mail: roman.varbanets@gmail.com, ORCID: 0000-0001-6730-0380.

Valentyn Malchevskyi – candidate of technical sciences, associate professor of the department of Ship Power Plants and Technical Operation, Odesa National Maritime University, Odesa, Ukraine,
e-mail: valentinmalchevsky@gmail.com, ORCID: 0000-0003-3117-1251.

Dmytro Minchev – candidate of technical sciences, associate professor of the department of internal engines, installations and technical operation of The Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine,
e-mail: misaidima@gmail.com, ORCID: 0000-0002-5960-3063.

Vitalii Zalozh – candidate of technical sciences, associate professor of the department of Engineering Sciences, Danube institute of National university «Odesa Maritime Academy», Izmail, Ukraine,
e-mail: zalozh@dinuoma.com.ua, ORCID: 0000-0002-5213-6896.

Vladislav Kyrnats – candidate of technical sciences, associate professor of the department of Ship Power Plants and Technical Operation, Odesa National Maritime University, Odesa, Ukraine,
e-mail: kirmacsylad@gmail.com, ORCID: 0000-0002-8308-7994.

Nadezhda Alexandrovskaya – candidate of technical sciences, associate professor of the department "Ship Power Plants and Technical Operation", Odesa National Maritime University, Odesa, Ukraine,
e-mail: a.nadegda@gmail.com, ORCID: 0000-0001-6591-2068.