

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ОДЕСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ МОРСЬКИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
(ОНМУ)

Кирнац Владислав Іванович

УДК 621.436:629.128.6

**КОМПЛЕКСНА ЕКСПЛУАТАЦІЙНА ПАРАМЕТРИЧНА ДІАГНОСТИКА  
РОБОЧОГО ПРОЦЕСУ ТРАНСПОРТНИХ ДИЗЕЛІВ**

05.22.20 – Експлуатація та ремонт засобів транспорту

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Одеса – 2018

Дисертація на правах рукопису.

Робота виконана на кафедрі «Суднових енергетичних установок і технічної експлуатації» Одеського національного морського університету Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор  
**Варбанець Роман Анатолійович**,  
Одеський національний морський університет,  
завідувач кафедри «Суднових енергетичних установок і технічної експлуатації» (м.Одеса)

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, доцент,  
**Грицук Ігор Валерійович**  
Херсонська державна морська академія,  
професор кафедри «Експлуатації суднових енергетичних установок» (м. Херсон)

кандидат технічних наук,  
**Головань Андрій Ігорович**  
інженер компанії МНПП «Лептон» (м.Одеса)

Захист дисертації відбудеться «23» лютого 2018 року о 10:00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д41.060.01 в Одеському національному морському університеті за адресою: вул. Мечникова, 34, м. Одеса 65029, Україна.

З дисертацією можна ознайомитися в науково-технічній бібліотеці ім. проф. Г.К. Сулова Одеського національного морського університету за адресою: вул. Мечникова, 34, м. Одеса 65029, Україна.

Автореферат розісланий «22» грудня 2017 року

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради Д 41.060.01  
кандидат технічних наук, доцент



Акімова О.В.

**Актуальність теми.** Експлуатація транспортних дизелів пов'язана з частими змінами зовнішнього навантаження і тривалою роботою на часткових режимах. Це призводить до інтенсивного зносу циліндропоршневої групи (ЦПГ), паливної апаратури (ПА) високого тиску, механізму газорозподілу (МГР) і системи газотурбінного наддуву (ГТН). При цьому відомо, що потужність і питома витрата палива в значній мірі залежить від технічного стану ПА високого тиску, МГР і ГТН, які необхідно діагностувати в процесі експлуатації з метою визначення технічного стану механізмів і запобігання аварійних ситуацій.

Моніторинг робочого процесу в умовах експлуатації і визначення індикаторних параметрів транспортних дизелів (ТД) дозволяє виконувати ефективну діагностику ПА, МГР і ЦПГ в разі аналізу даних щодо кутів повороту колінчастого вала. Відомі методи діагностування супроводжуються тимчасовим виведенням транспортного засобу з експлуатації. У зв'язку з цим, актуальним стає використання аналітичного рішення задачі синхронізації даних моніторингу робочого процесу, що дозволить виконувати діагностику ТД в процесі експлуатації.

Одним з основних дефектів, що виникають в умовах експлуатації транспортного дизеля на часткових режимах, є підвищена вібрація ротора ГТН, що виникає внаслідок нерівномірного відкладення сажі в проточній частині та на лопатках робочого колеса. Дефекти підшипників, що зароджуються також викликають підвищену вібрацію ротора ГТН. Незалежно від причини виникнення, підвищена вібрація ротора ГТН може привести до виходу з ладу системи турбонадува, різкого падіння потужності двигуна і навіть до аварійної ситуації. Тому актуальною є задача розвитку та вдосконалення доступних і зручних в експлуатації ТД методів вібродіагностики ГТН за допомогою спектрального аналізу віброакустичних сигналів.

У зв'язку з викладеним, комплексне параметричне діагностування транспортних дизелів є актуальною науково-практичною задачею, і визначає значимість дисертаційного дослідження для транспортної галузі.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота відповідає пріоритетним напрямкам наукових досліджень в області "Енергетика та енергоефективність. Технології енергетичного машинобудування", затверджених Постановою Кабінету Міністрів України №942 від 7 вересня 2011 р. Дисертаційна робота пов'язана з науково-дослідною тематикою кафедри «Суднові енергетичні установки та технічна експлуатація» Одеського національного морського університету. Наукові результати, що представлені в дисертації, використані: в держбюджетних НДР «Удосконалення технічної експлуатації суднових енергетичних установок» ДР № 0214U007088 від 17.01.2013, ДР № 0215U004492 від 05.03.2014, ДР № 0216U000617 від 29.12.2015 (автор - виконавець); в хоздоговірній роботі «Розробка і впровадження методів параметричної діагностики дизелів тепловозів для зниження витрат на

паливо і ремонт» за договором № 07/13 від 20.07.2013р., між ДП «Одеська залізниця» і Одеським національним морським університетом ОНМУ (автор - відповідальний виконавець).

**Мета і завдання дослідження.** Метою дослідження є розробка методів комплексного діагностичного контролю транспортних дизелів з урахуванням умов експлуатації.

Для досягнення мети в роботі поставлені такі основні завдання:

- аналіз існуючих методів експлуатаційної параметричної діагностики транспортних дизелів для оцінки ефективності їх застосування в експлуатації;

- розробка комбінованого методу синхронізації даних моніторингу параметрів робочого процесу дизелів з урахуванням умов експлуатації транспортних дизелів;

- удосконалення методу вібродіагностики газотурбонагнітача ТД за допомогою спектрального аналізу віброакустичних сигналів компресора;

- розробка комплексного методу контролю робочого процесу транспортних дизелів в умовах експлуатації;

- вдосконалення системи параметричної діагностики робочого процесу транспортних дизелів відповідно до умов експлуатації;

- експериментальне підтвердження методів комплексного діагностичного контролю ТД в умовах експлуатації та планових ремонтів.

**Об'єктом дослідження** є робочий процес транспортних дизелів в умовах експлуатації.

**Предметом дослідження** є методи комплексної параметричної діагностики робочого процесу ТД на базі аналітичної синхронізації даних з використанням віброакустичного контролю вузлів паливної апаратури, механізму газорозподілу і газотурбонагнітача.

**Методи дослідження.** Дослідження базується на основних положеннях теорії двигунів внутрішнього згорання. Для моделювання і розрахунку параметрів робочого циклу використовувалося середовище «AVL BOOST (C)». Тепловиділення в циліндрі розраховувалося за допомогою методів І.І. Вібе і В.С. Семенова. Крім того використовувалися:

- метод аналітичної синхронізації даних моніторингу параметрів робочого процесу ТД;

- методи цифрової фільтрації на базі дискретного перетворення Фур'є в задачах моніторингу параметрів робочого процесу ТД;

- методи спектрального аналізу вібраційних характеристик системи турбонаддуву ТД;

- методи статистичної обробки експериментальних даних.

В експериментальних дослідженнях використовувалась система параметричної діагностики ТД «D4.0H». Інтерфейс розрахункових програм був розроблений за допомогою програмного середовища «Delphi» і математичних бібліотек «NumericToolbox». Для аналізу спектрів вібрації був

використаний пакет «RightMarkAudioAnalyzer». Для візуалізації даних і побудови моделей використовувалася середовище «Grapher».

Достовірність наукових положень дисертаційної роботи підтверджується відповідністю результатів математичного моделювання з експериментальними даними, отриманими при експлуатації ТД, а також експериментальною перевіркою достовірності діагностичних висновків.

#### **Наукова новизна отриманих результатів:**

- вперше розроблено і застосовано комбінований аналітичний метод синхронізації даних моніторингу параметрів робочого процесу транспортних дизелів, який дозволив підвищити якість розрахунку робочого процесу при випробуваннях дизелів в умовах експлуатації;

- вдосконалено модель закону тепловиділення в циліндрі, що дозволяє підвищити якість моделювання робочого процесу транспортних дизелів на часткових режимах експлуатації (за базову - взята модель В.С. Семенова);

- отримав подальший розвиток метод контролю робочого процесу транспортного двигуна, що включає віброакустичний контроль подачі палива і газорозподілу;

- отримав подальший розвиток і вдосконалено метод вібродіагностики газотурбонагнітача транспортного дизеля за допомогою спектрального аналізу віброакустичних сигналів повітряного компресора.

**Практичне значення.** На підставі проведених розрахунково-аналітичних і експериментальних досліджень удосконалено програмно-апаратний комплекс «D4.0H», призначений для параметричної діагностики транспортних дизелів в умовах експлуатації та планових ремонтів. Також вдосконалено програмне забезпечення аналітичної синхронізації даних і отримали подальший розвиток методи віброакустичної діагностики технічного стану ПА високого тиску, МГР і ГТН в умовах експлуатації.

Результати дисертації впроваджені на транспортних засобах:

- маневрових тепловозах ЧМЭ-3 в системі «Одеська залізниця» (акти впровадження за 2013-2014 рр);

- на т/х «Greifswald» ГСК «УКРФЕРРИ» (Україна, м. Одеса, акт впровадження за 2017р.).

Результати дисертаційного дослідження впроваджені в навчальний процес Одеського національного морського університету і використовуються при читанні дисциплін «Технічна експлуатація суднових енергетичних установок» і «Системи діагностування».

**Особистий внесок автора.** Всі положення, винесені на захист, отримані автором особисто. Дисертація є самостійним дослідженням і оформлена у вигляді рукописної монографії, що написана автором особисто. У спільній роботі [1] здобувач брав участь у постановці і проведенні експерименту, обробці даних діагностування та формуванні висновків. У статті [2] здобувач здійснював експериментальну перевірку розроблених ним методів комплексного діагностичного контролю робочого процесу транспортних дизелів, виконував аналіз і добірку методів вібродіагностики двигунів. У

спільній роботі [3] внесок дисертанта – методологія комплексного діагностичного контролю дизеля тепловоза, включаючи систему газотурбінного наддуву. У спільній роботі [4] дисертант виконав математичне моделювання робочого процесу дизеля в середовищі AVL BOOST та зробив аналіз результатів діагностування. У статті [5] здобувачем розроблена і проаналізована технологічна карта наукових досліджень.

Автором особисто проведена робота по організації наукових досліджень та проведення діагностичного контролю тепловозних дизелів на станції реостатних випробувань в локомотивному депо № 1, Одеса-Сортувальна за госпдоговірною роботою № 07/13 від 20.07.2013г., між ДП «Одеська залізниця» та ОНМУ, в якій автор був відповідальним виконавцем.

**Апробація результатів дисертації.** Основні результати дисертаційного дослідження доповідалися на 9 міжнародних науково-практичних конгресах і конференціях:

- XIX, XX, XXII міжнародні Конгреси двигунобудівників, Національний аерокосмічний університет ім. Н.С. Жуковського «ХАІ» – Харків-Коблево (Рибаче), вересень 2014–2017 рр.;

- міжнародні науково-практичні конференції «Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT), Херсонська державна морська академія - Херсон, травень 2015–2016 рр.;

- міжнародні науково-практичні конференції «Сучасні енергетичні установки на транспорті, технології та обладнання для їх обслуговування», Херсонська державна морська академія – Херсон, вересень 2015–2016 рр.;

- II міжнародна науково-практична конференція «Екологічна безпека як основа сталого розвитку суспільства. Європейський досвід і перспективи», Львівський державний університет безпеки життєдіяльності - Львів, листопад 2015 р.;

- II міжнародна науково-практична конференція «Міжнародні транспортні коридори: вісь Захід-Схід і Шовковий шлях», Одеський національний морський університет - Одеса-Батумі, травень 2016 р.

**Публікації.** За темою дисертації опубліковано 5 наукових робіт в спеціалізованих науково-технічних збірниках ВАК, включених в наукометричних баз і рекомендованих для публікації результатів дисертаційних досліджень.

**Структура і обсяг роботи.** Дисертація складається зі вступу, 4 розділів, висновків, додатків та списку використаних джерел. Загальний обсяг роботи становить 143 стор., в тому числі 25 рисунків 12 таблиць. Список використаних джерел становить 132 найменувань на 12 сторінках. У додатку наведені акти впровадження результатів дисертаційного дослідження.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обгрунтовано актуальність завдання створення комплексної параметричної діагностики робочого процесу транспортних дизелів. Показано, що загальними умовами експлуатації є тривала робота дизелів на часткових режимах, що характеризуються частими змінами навантаження, які призводять до дефектів ПА і МГР, а також підвищеною вірогідністю засмічення газовипускного тракту. Сформульована мета і основні напрямки досліджень. Показано практичне значення отриманих результатів, показаний особистий внесок здобувача, наведені дані апробації результатів дисертаційного дослідження.

У першому розділі розглянуто існуючі методи діагностичного контролю робочого процесу транспортних дизелів. Досліджено системи контролю робочого процесу транспортних дизелів, а саме: їх призначення, технічні характеристики, основні вимірювальні елементи систем і параметри робочого процесу, що вимірюються за допомогою системи. Наведено умови планових ремонтів ТД. Досліджено методи контролю процесу згоряння в циліндрах, методи віброакустичного контролю паливної апаратури високого тиску, механізму газорозподілу і газотурбонагнітача. На підставі аналізу існуючих методів діагностичного контролю робочого процесу досліджено проблему їх ефективності в умовах планових ремонтів ТД.

Внаслідок некритичних дефектів, що виникають в процесі експлуатації, відбувається зниження рівня експлуатаційних характеристик ТД. Звичайна практика полягає в тому, що експлуатація ТД відбувається при питомих ефективних витратах палива, що на 5-10% перевищують паспортні значення, при цьому навантаження відповідає 60-75% номінальної потужності, а температури випускних газів доходять до гранично допустимих значень. Фактично температури випускних газів є основним критерієм, що обмежує навантаження ТД.

Нерівномірний знос (в першу чергу ПА високого тиску) призводить до нерівномірного розподілу потужності між циліндрами. Це підвищує рівень вібрації всього дизеля і створює теплові перевантаження окремих циліндрів. Максимально теплонапружений циліндр, який визначається в експлуатаційних умовах по температурі випускних газів, обмежує потужність всього дизеля. Нерівномірність потужностей, максимального тиску згоряння, температур випускних газів по циліндрам призводить до обмеження потужності всього дизеля, перегріву і навіть прогорання випускних клапанів окремих циліндрів.

Звичайна практика планових ремонтів полягає в приблизній оцінці технічного стану вузлів дизеля і подальшої трудомісткої процедури демонтажу, заміни та повторного монтажу деталей ПА, МГР і елементів ЦПГ. Основний перед- і післяремонтний аналіз технічного стану проводиться за значеннями температури випускних газів і інших непрямих показників.

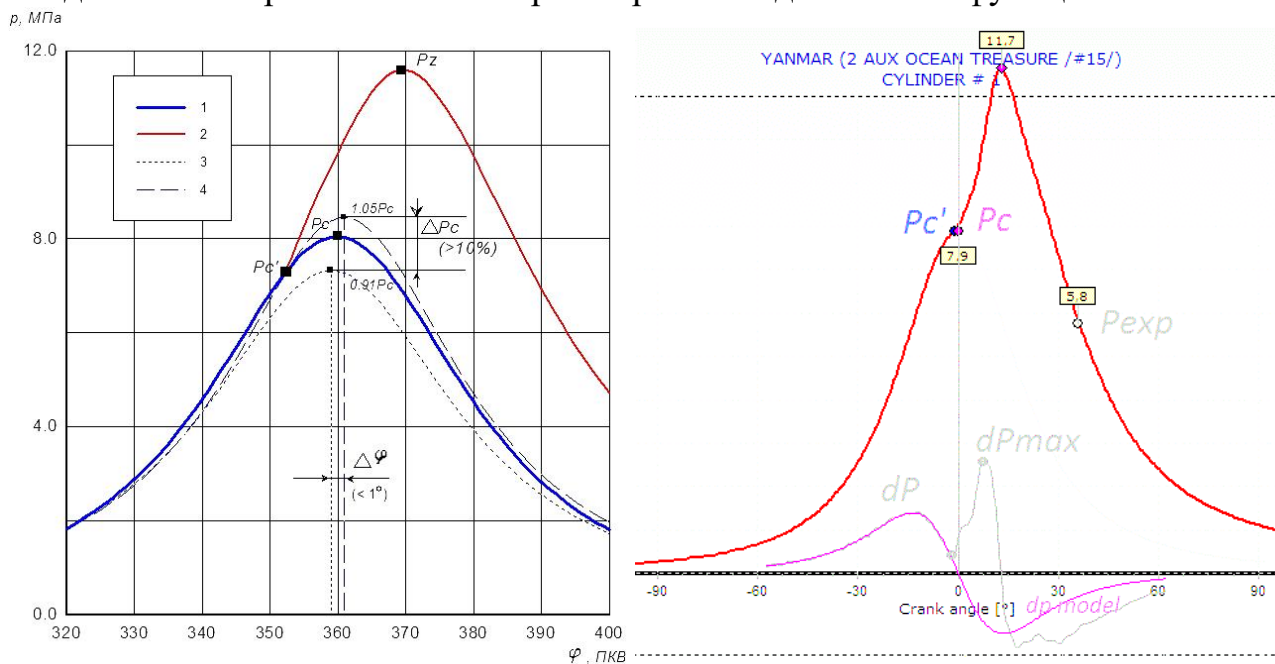
З теорії і практики експлуатації ТД відомо, що точну діагностичну картину ЦПГ, ПА і МГР дає тільки аналіз термодинамічних процесів, що відбуваються під час робочого циклу.

Ефективна експлуатація дизеля базується на постійному контролі основних, найбільш значущих параметрів робочого процесу. Процеси подачі палива і газорозподілу є невід'ємними складовими робочого процесу дизеля транспортного засобу.

Отримані в розділі результати визначили вибір напрямку дисертаційного дослідження. Обґрунтовано вибір теми дисертаційного дослідження, показана її актуальність і відповідність паспорту спеціальності "05.22.20 – Експлуатація та ремонт засобів транспорту". Розроблено технологічну карту наукового дослідження, яка дозволяє логічно зв'язати запит практики, цілі і завдання дослідження, основні наукові результати і практичну цінність роботи.

Аналіз розглянутих методів дозволив сформулювати основні напрямки дисертаційного дослідження.

У другому розділі досліджується і вирішується первинне завдання моніторингу і діагностики робочого процесу - завдання синхронізації даних щодо кутів повороту колінчастого вала. Під час випробувань ТД, використання апаратної синхронізації даних важко, а часом і неможливо, у зв'язку з вимогами неруйнівного контролю і через брак часу. У зв'язку з цим в даній роботі використана модифікована методика аналітичної синхронізації, яка об'єднує переваги методу аналізу першої похідної кривої тиску в циліндрі від кута повороту колінчастого вала (ПКВ)  $dp/d\varphi$  і моделювання кривої стиснення розширення за допомогою функції Аньезі.



а) модель "Аньезі" б) модель  $dp/d\varphi = 0$   
 Рис. 1. Дві моделі алгоритмічної синхронізації даних моніторингу ТД



Перший метод алгоритмічної синхронізації, заснований на моделюванні ділянки стиснення функцією типу «Аньезі» (рис. 1а)

$$P(\varphi) = \frac{P_c}{1 + k(\varphi - m)^2},$$

де  $k$  і  $m$  – коефіцієнти, які визначаються в результаті мінімізації функціоналу з незалежної змінної  $\varphi_j$ , де індекс  $j$  змінюється від 1 до  $l$

$$\bar{F} = \sum_{j=1}^l \left[ \frac{P_j}{P(\varphi_j)} - 1 \right]^2 \rightarrow \min$$

Вводити ваговий коефіцієнт для посилення впливу точок, що знаходяться поблизу верхньої мертвої точки (ВМТ) немає необхідності, тому що ця область буде більш значущою виходячи з характеру самої функції Аньезі.

Мінімізація функціоналу  $\bar{F}$  здійснюється, виходячи з умови одночасної рівності нулю частинних похідних

$$\left\{ \frac{\partial F}{\partial k} = 0; \frac{\partial F}{\partial m} = 0; \frac{\partial F}{\partial P_c} = 0 \right\}$$

Система, де значення  $m$  – координата ВМТ поршня, вирішується до певного етапу в аналітичній формі. Остаточне рівняння від  $m$  є трансцендентним і вирішується чисельним методом. Суми від 1 до  $l$  позначимо квадратними дужками:

$$\left\{ \begin{array}{l} [cb]/[db] = [c]/[d] \\ P_c = \frac{[p_j^2 e_j^2]}{[p_j e_j]} \end{array} \right\}, \quad (A)$$

$$\text{де } a_j = p_j / p_c; b_j = (\varphi_j - m); d_j = a_j^2 b_j^3; c_j = a_j b_j (1 - a_j);$$

$$e_j = \bar{\gamma}_j (1 + k(\varphi_j - m)^2);$$

Основна властивість моделі "Аньезі" полягає в тому, що розрахункове значення коефіцієнта  $m$  (координата ВМТ) незначно відрізняється від істинного ВМТ при завданні початкового значення величини  $P_c$  з похибкою до 8% (рис.1а).

Метод алгоритмічної синхронізації, заснований на базі рішення рівняння  $P'(\varphi) = 0$ , проводиться виходячи з того, що за відсутності згоряння в циліндрі швидкість зміни тиску в ВМТ дорівнює нулю (рис. 1 б)

$$\frac{dP}{d\varphi_{\text{ВМТ}}} = 0.$$

У процесі розрахунку алгоритму мінімізації методом найменших квадратів (МНК) функціоналу використовується двічі: спочатку для попередньої оцінки положення ВМТ (лінійна або синусоїдальна модель) і

згодом остаточний розрахунок шляхом моделювання швидкості зміни тиску  $dp/d\varphi$  виходячи з рівняння стиснення:

$$\left\{ \begin{array}{l} P = P_a \varepsilon^{n_1} \\ V_\varphi = V_c + 0,5V_s \left[ 1 + \frac{1}{\lambda_{III}} - \cos \varphi - \frac{1}{\lambda_{III}} \sqrt{1 - (\lambda_{III} \sin \varphi)^2} \right] \end{array} \right\},$$

де  $P_a$  – тиск на початку стиснення;  $V_\varphi$  – поточний обсяг циліндра;  $V_s = V_c(\varepsilon - 1)$  – обсяг, описуваний повним ходом поршня;  $V_c$  – обсяг камери стиснення;  $\lambda_{III} = R_{кр} / L_{III} = S / (2 \cdot L_{III})$  – відношення радіуса кривошипу до довжини шатуна.

Розрахункове вираження для швидкості зміни тиску на ділянці стиснення:

$$\frac{dP_{comp}}{d\varphi} = -P_a V_a^{n_1} n_1 \frac{1}{V_\varphi^{n_1+1}} \cdot 0,5V_s \left( \sin \varphi + \frac{\lambda_{III} \sin \varphi \cos \varphi}{\sqrt{1 - \lambda_{III}^2 \sin^2 \varphi}} \right) \quad (B)$$

Система (А) і рівняння (В) вирішуються в ітераційному циклі, причому спочатку використовується властивість (А) незначного впливу першого наближення  $P_c$  на координату  $m$  (ВМТ).

Визначення глобального мінімуму можлива тільки після попереднього визначення ВМТ, яка використовується для завдання умови в процедурі мінімізації функціоналу  $\bar{F}$ . Без завдання точних початкових умов процедура мінімізації може закінчитися в локальному мінімумі функціоналу  $\bar{F}$  і при цьому не буде забезпечена необхідна якість моделювання (похибка визначення ВМТ складе від 3 до 5° ПКВ, що є неприпустимим).

Використання модифікованого алгоритму при діагностуванні ТД дозволяє визначати ВМТ з точністю до 0,5° ПКВ і переважно з таких міркувань:

1) автоматичний облік різнорідних похибок визначення ВМТ під навантаженням ТД (*встановлення фазового датчика і маркування маховика виконуються на зупиненому двигуні. Під час роботи дизеля ВМТ зміщується: через транспортну затримку сигналу тиску від центру циліндра до мембрани датчика по каналу індикаторного крана; скручування колінчастого вала, пропорційно навантаженню і збільшується на далеких від маховика циліндрах; через крутильні коливання; зазорів в КШМ і інших чинників, які неможливо врахувати в «статистиці»*):

2) можливість виконувати індиціювання без попередньої підготовки дизеля (*під час діагностики дизеля в судових умовах або в умовах реостатних випробувань системами діагностування, що використовують апаратну синхронізацію, найбільш трудомістка і тривала частина налаштування системи - установка фазового датчика і маркування маховика*).

Застосування вдосконаленого автором методу аналітичної синхронізації виключає часові та фінансові витрати на встановлення фазових датчиків. Розрахунковий метод дозволяє виконувати індиціювання дизеля

безпосередньо в процесі його експлуатації без примусової зміни режиму його роботи і без спеціальної підготовки, яка необхідна при апаратній синхронізації даних. Аналітична синхронізація дозволяє створити універсальну систему оперативного діагностичного контролю робочого процесу.

У третьому розділі розроблена математична модель транспортного двигуна в середовищі AVL BOOST. Представленні методи розрахунку основних параметрів робочого процесу ТД. Досліджено основні дефекти ТД і їх вплив на робочий процес в циліндрах і емісію NOx, COx.

Розрахунок термодинамічних процесів в циліндрі заснований на першому законі термодинаміки:

$$\frac{d(m_c \cdot u)}{da} = -p_c \cdot \frac{dV}{da} + \frac{dQ_F}{da} - \sum \frac{dQ_W}{da} - h_{BB} \cdot \frac{dm_{BB}}{da} + \sum \frac{dm_i}{da} \cdot h_i - \sum \frac{dm_e}{da} \cdot h_e - q_{ev} \cdot f \cdot \frac{dm_{ev}}{dt};$$

зміну маси в циліндрі можна розрахувати з суми мас:

$$\frac{dm_c}{da} = \sum \frac{dm_i}{da} - \sum \frac{dm_e}{da} - \frac{dm_{BB}}{da} + \frac{dm_{ev}}{dt};$$

де  $\frac{d(m_c \cdot u)}{da}$  - зміна внутрішньої енергії в циліндрі;  $-p_c \cdot \frac{dV}{da}$  - робота поршня;  $\frac{dQ_F}{da}$  - підведення теплоти від палива;  $\sum \frac{dQ_W}{da}$  - втрати тепла від стінок;  $h_{BB} \cdot \frac{dm_{BB}}{da}$  - ентальпія потоку;  $m_c$  - маса робочого тіла в циліндрі;  $u$  - питома внутрішня енергія;  $p_c$  - тиск в циліндрі;  $V$  - обсяг циліндра;  $Q_F$  - енергія палива;  $Q_W$  - втрата тепла від стінок;  $a$  - кут повороту колінчастого вала;  $dm_i$  - маса елементів, що надходять в циліндр;  $dm_e$  - маса елементів на виході з циліндра;  $h_i$  - ентальпія елементів, що надходять в циліндр;  $h_e$  - ентальпія елементів на виході з циліндра;  $q_{ev}$  - теплота випаровування палива;  $f$  - частка теплоти випаровування від заряду в циліндрі;  $dm_{ev}$  - маса випаровування палива.

Метод чисельного моделювання дозволяє розрахувати робочі процеси не тільки для номінальних, а й для перехідних режимів і режимів часткового навантаження. Останні у ТД складають вагомому частину загального напрацювання двигуна і є причиною їх підвищеного зносу.

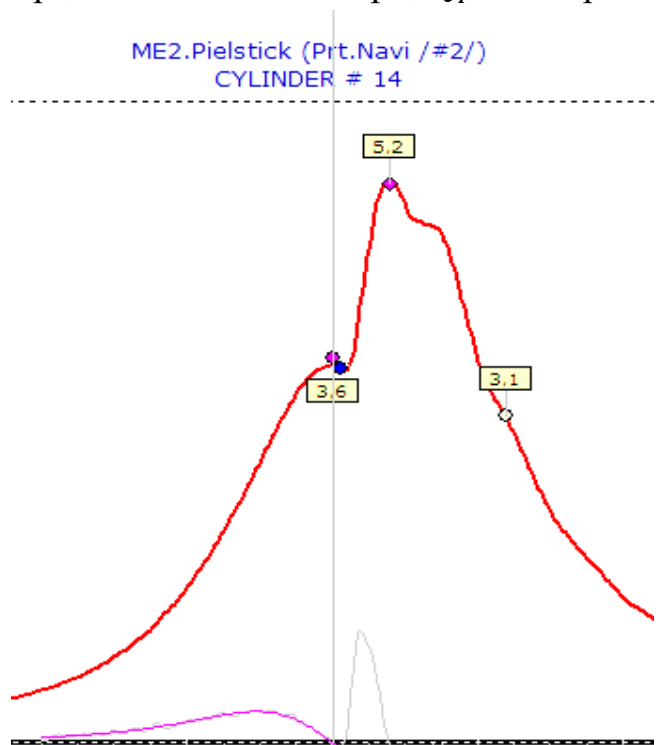


Рис. 2. Робочий процес ТД Pielstick PC25L на частковому режимі

Робочий процес ТД на часткових режимах характеризується хвильовим процесом згоряння (рис.2). Найбільш значущими є перші дві фази цього процесу, в зв'язку з цим для апроксимації фактичної характеристики тепловиділення використовується модифікована двухфазна модель Семенова - Квятковського:

$$\frac{dx}{d\varphi} = \frac{A_1}{\varphi_1} k_1 e^{-0.5k_1^2} + \frac{A_2}{\varphi_2} k_2 e^{-0.5k_2^2};$$

де  $\varphi_i$  – кут затримки запалення палива;

$\varphi_1, \varphi_2$ , – зміщення максимумів швидкості тепловиділення на кожній з фаз;  $A_1, A_2$  – коефіцієнти, що визначаються за допомогою навантажувальних критеріїв  $\Pi_n, \Pi_{H1}, \Pi_{H2}$ :

$$A_1 = \frac{181,4}{\Pi_n} \Pi_{H1}^2 \frac{\varphi_1}{\varphi_i}; A_2 = \frac{0,01}{\Pi_n} \Pi_{H2}^{0,5} \varphi_2.$$

У ряді випадків, коли не використовується багатофазна паливоподача, може бути використана модель тепловиділення І.І. Вібе.

Для комплексного контролю параметрів РП і більш точного визначення обсягу ремонтних робіт необхідно також визначити і проаналізувати вібродіаграми ПА і МГР.

На установках по дослідженню ПА високого тиску кафедри СЕУ і ТЕ ОНМУ були записані і досліджені вібродіаграми різних вузлів ПА ТД (ЧН 25/34 и NVD24).

Оцінка інформативності віброакустичних сигналів

показала, що найбільшою інформативністю мають вібродіаграми, записані з торця форсунки (рис. 3). В момент підйому голки (рис.3 b-c) і удару її об верхній упор (рис.3 d) виникають коливання на торці форсунки (рис.3 віброімпульс фаза e). В момент підйому голки видно характерний перегин на діаграмі тиску на соплі (рис.3 c). Такий перегин, характеризує незначне падіння тиску в паливній системі в момент підйому голки. У деяких системах діагностики (Autronica AS, Premet) цей факт використовується для визначення моменту початку впорскування палива (дійсного кута випередження). Однак відомо, що для багатьох ТД на експлуатаційних режимах підйом голки не викликає істотного падіння тиску у всій магістралі і діаграма тиску ПНВТ має гладку форму. В момент посадки голки (рис.3 f-j)

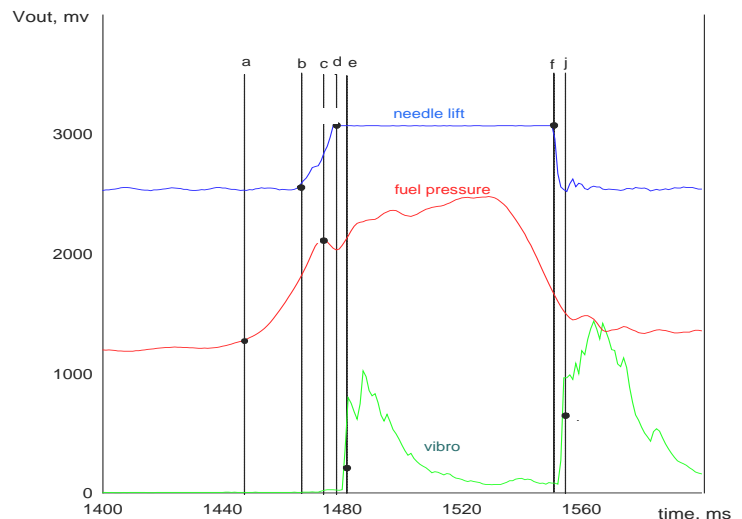
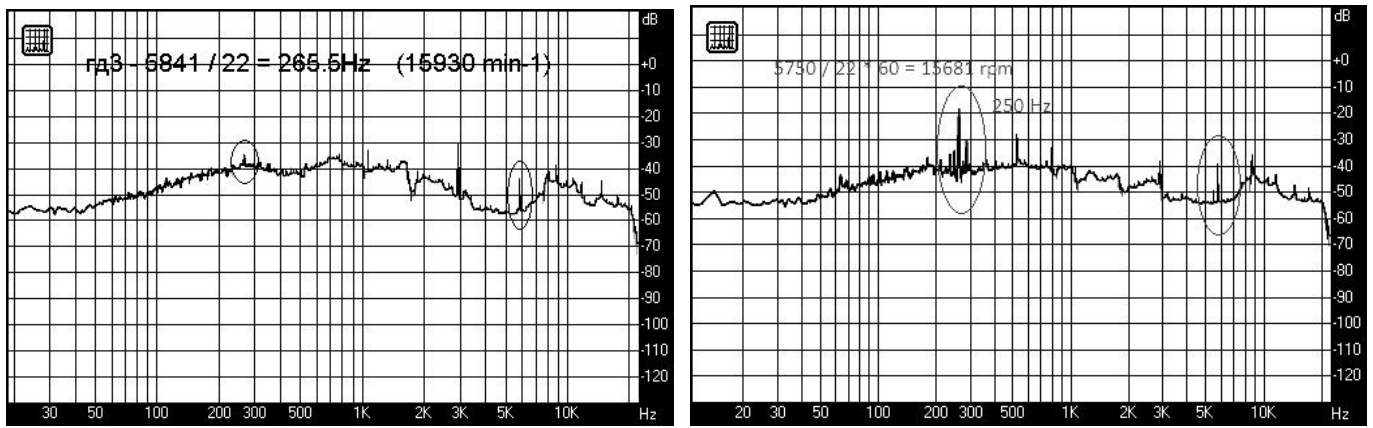


Рис. 3. Вібродіаграма впорскування ТД

виникає другий віброімпульс (рис.3 j). Фази передніх фронтів віброімпульсів визначаються за допомогою аналізу перших похідних, які мають максимуми в цих точках. Таким чином, використання вібродіаграми впорскування дає можливість визначити дійсні кути випередження і тривалості впорскування палива. Форма вібродіаграми відображає технічний стан форсунки і ПНВТ.

Вібродіагностика коливань ротора ГТН на основних частотах обертання. Встановлення віброакустичного датчика на корпус ГТН дозволяє записати спектр віброакустичних сигналів ГТН в режимі експлуатації.

Аналіз спектру (рис. 4) дозволяє з високою точністю визначити частоту обертання ротора ГТН, а також виконувати діагностику технічного стану ГТН за амплітудою гармоніки на основній частоті обертання. У якості аналізованих величин розглядаються частоти і амплітуди окремих гармонік.



а) спектр ГТН ГД 3

б) спектр ГТН ГД 2

Рис. 4. Амплітудні спектри вібрації турбокомпресорів головних дизелів ГД 2 і 3 т/х "Greifswald" типу 6VDS48/42AL-2 (2648 кВт)

Лопаткова частота компресора знаходиться нижче 7 кГц і може бути визначена з похибкою менш 10 Гц, що зводить максимальну відносну похибку до величини менш 1 %.

$$TURrpm(ME3) = \frac{f_{\text{лопаточна}}}{n_{\text{лопатоk}}} \times 60 = \frac{5841}{22} \times 60 = 15930 \text{ об/хв}$$

$$TURrpm(ME2) = \frac{f_{\text{лопаточна}}}{n_{\text{лопатоk}}} \times 60 = \frac{5750}{22} \times 60 = 15681 \text{ об/хв}$$

На прикладі ГТН ТД (рис. 4) видно, що частоти основних коливань роторів ГТН 265.5 Гц і 250 Гц відповідно. Для ГТН 3 амплітуда гармоніки на основній частоті обертання знаходиться в межах норми (не перевищує 3% середнього рівня). Для ГТН 2 амплітуда основної гармоніки значно перевищує середній рівень (більше 15%). Крім того, в спектрі ГТН 2 з'явився ряд сусідніх гармонік близьких до основної частоти, що говорить про підвищений рівень вібрації ротора і необхідності проведення його позачергової профілактики.

У четвертому розділі наведені результати використання методу комплексної параметричної діагностики транспортних дизелів, зокрема морських і залізничних.

Для підвищення ефективності оцінки технічного стану ТД і визначення обсягу ремонтних робіт необхідно проводити діагностику робочого процесу ТД, що включає віброакустичний аналіз ПА, МГР і ГТН. На підставі запропонованих методів синхронізації даних і вібродіагностики ГТН вдосконалена система параметричної діагностики «D4.0H».

Під час реостатних випробувань визначаються параметри робочого процесу, які дозволяють з великою вірогідністю без розбирання визначати: дефекти циліндропоршневої групи ЦПГ; несправності ПА високого тиску (ПНВТ, форсунки); несправності роботи клапанів газорозподілу; динамічне балансування ротора ГТН.



Рис. 5. Передремонтна діагностика тепловозного дизеля K6S310DR на станції реостатних випробувань в локомотивному депо № 1, Одеса-Сортувальна

Експериментальне підтвердження методів комплексного діагностичного контролю ТД показано на прикладі дизеля K6S310DR (рис. 6). У циліндрі № 5 видно порушення регулювання механізму



газорозподілу – неоднчасне закриття клапанів, компресія в циліндрі нижче норми, стан паливної апаратури високого тиску - нормальне.

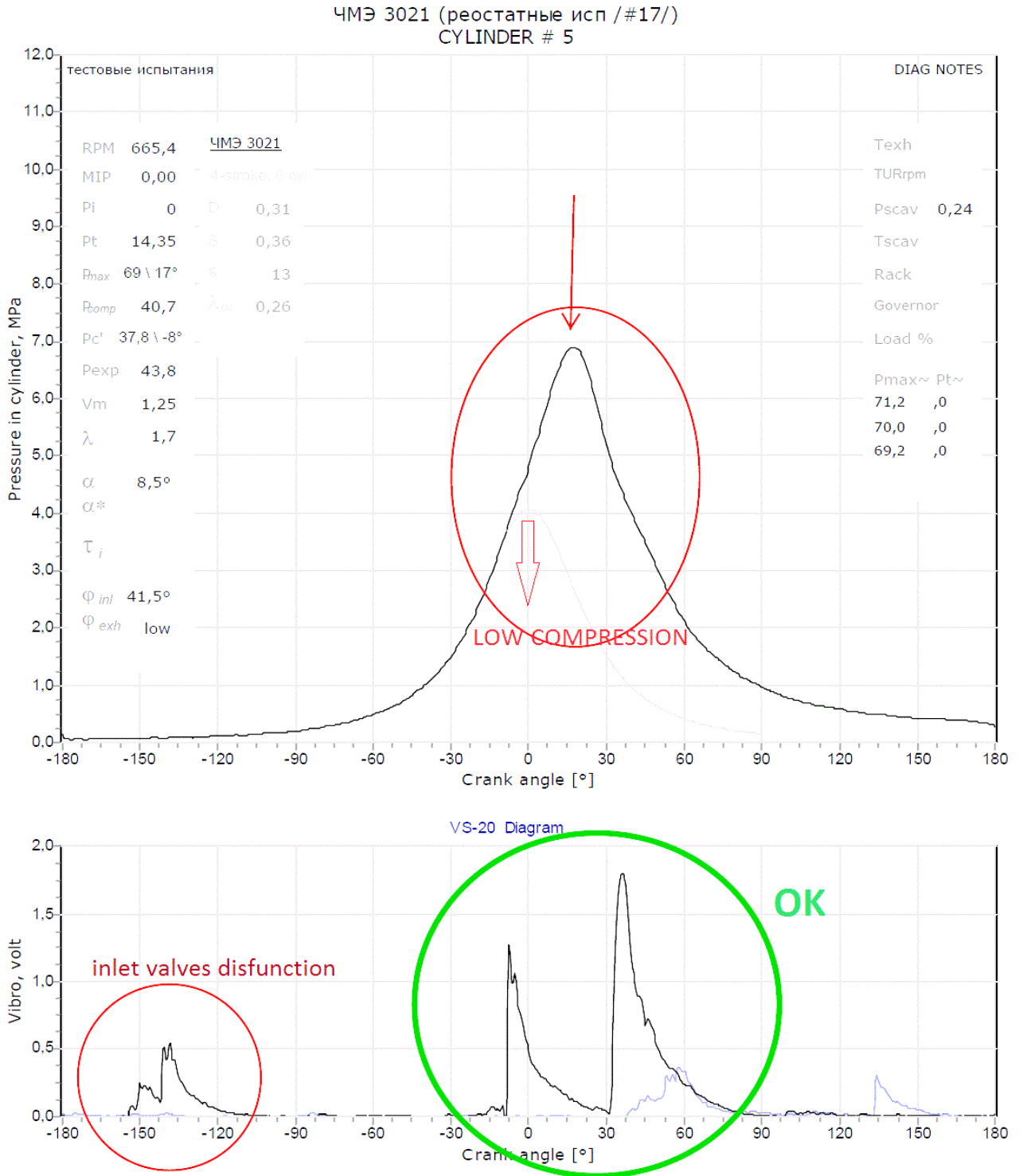


Рис. 6. Приклад параметричної діагностики одного циліндра дизеля K6S310DR маневрового тепловоза ЧМЭ-3 (D4.0H software screenshot)

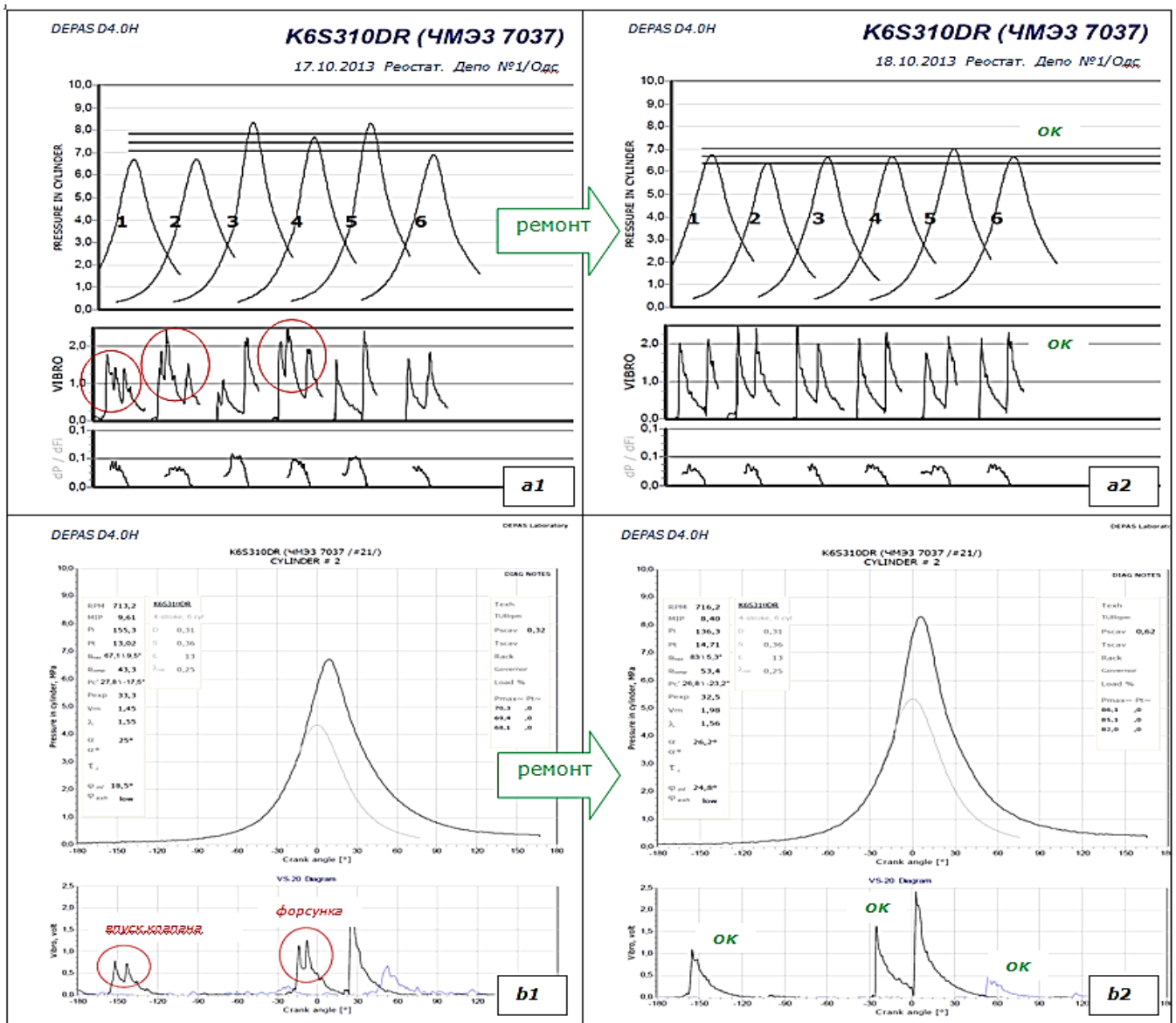


Рис. 7. Результати індиціювання транспортного дизеля K6S310DR до і після ремонту (D4.0H software screenshot)

На вимогу локомотивної служби індиціювання виконувалось двічі: до і після планових ремонтних робіт. При необхідності, якщо після ремонту виявлялися критичні зауваження, цикли ремонт-індиціювання повторювалися. Після закінчення ремонтних робіт індиціювання (рис. 7) показало наступні результати:

- зменшена нерівномірність розподілу потужностей між циліндрами до 3 %;
- зменшена нерівномірність розподілу максимальних тисків згоряння між циліндрами до 4 %;
- зменшена нерівномірність розподілу максимальних температур випускних газів між циліндрами до 5 %;



## ВИСНОВКИ

У дисертації поставлена та вирішена науково-практична задача розробки методів комплексної параметричної діагностики робочого процесу ТД. Отримано нові рішення задач: синхронізації даних, моделювання робочого процесу в середовищі AVL BOOST і віброакустичної діагностики ПА високого тиску, МГР і ГТН. Отримані в роботі наукові та практичні результати дозволяють зробити нижчеперелічені висновки.

1. Аналіз показав, що методи параметричної діагностики, які застосовуються, недостатньо ефективні на характерних для транспортних дизелів експлуатаційних режимах. Для моделювання робочого процесу може бути використаний більш досконалий і спрощений метод розрахунку тепловиділення; необхідна модифікація алгоритму синхронізації даних; методів віброакустичної діагностики ПА високого тиску і МГР і методу вібродіагностування ГТН. Зазначені дослідження дозволять підвищити якість і достовірність діагностичної інформації, а також ефективність експлуатації транспортних дизелів.

2. Отримано метод синхронізації даних моніторингу робочого процесу транспортних дизелів, за рахунок комбінування методів «Аньезі» і  $dp/d\phi = 0$ , що дозволяє визначати ВМТ з точністю до  $0,5^\circ$  ПКВ. В результаті підвищується точність розрахунку робочого процесу і подальшої діагностики ЦПГ, ПА і МГР.

3. Отримано достовірну математичну модель робочого процесу транспортних дизелів, за рахунок удосконалення закону тепловиділення в циліндрі, що дозволило зменшити похибку моделювання до 3%, в порівнянні з експериментальними даними  $N_e$ ,  $g_e$  і основними параметрами робочого процесу.

4. Отриманий метод вібродіагностики ГТН транспортних дизелів, за рахунок використання спектрального аналізу віброакустичних сигналів повітряного компресора, дозволяє підвищити ефективність експлуатаційної та передремонтної діагностики.

5. Розроблено комплексний експлуатаційний метод контролю робочого процесу, за рахунок включення віброакустичного контролю подачі палива і газорозподілу, а також застосування спектрального аналізу при визначенні характеристик ГТН, що дозволяє підвищити ефективність ремонтних робіт ТД.

6. Отримані в дисертації наукові результати були формалізовані у вигляді алгоритмів, що дозволило модифікувати програмне і апаратне забезпечення системи параметричної діагностики «D4.0H». Це дозволило досягнути більш точних результатів параметричної діагностики ТД в експлуатації, підвищити достовірність діагностичних даних, що загалом сприяло підвищенню ефективності експлуатації і ремонтних робіт ТД на морському та залізничному транспорті.

7. В результаті впровадження розроблених в дисертації методів комплексної параметричної діагностики ТД в системі "Одеська залізниця" на

маневрових тепловозах ЧМЭ-3; на т/х «Greifswald» ГСК «УКРФЕРРИ» були зменшені сукупні витрати на технічне обслуговування ТД, а також скорочені і конкретизовані обсяги ремонтних робіт. Було підвищено якість та інформативність перед- і післяремонтної діагностики ТД, які експлуатуються на підприємствах. Результати дисертаційного дослідження впроваджено в навчальний процес Одеського національного морського університету (акти впровадження додаються).

8. Методи комплексного експлуатаційного параметричного аналізу і діагностики робочого процесу ТД, включаючи ЦПГ, ПА високого тиску, МГР і ГТН можуть бути використані у вищих технічних морських і залізничних навчальних закладах, судноплавних компаніях і залізничних підприємствах при підготовці інженерів.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Варбанець Р.А. Спектральний аналіз в задачах діагностики систем турбонаддуву суднових дизелів / Р.А. Варбанець, В.Г. Івановський, Л.В. Кошарска, Ю.Н. Кучеренко, В.І. Кирнац // Збірник наукових праць Донецького інституту залізничного транспорту Української державної академії залізничного транспорту. Науково-технічний журнал. Донецьк. 2013. – №34. – С. 141–145. (*Наукометрична база Google Scholar*).

*Здобувач брав участь у постановці і проведенні експерименту, обробці даних діагностування та формуванні висновків. Аналізував вплив шумів на результати спектрального аналізу вібродіаграм.*

2. Варбанець Р.А. Аналіз можливості вібродіагностики технічного стану суднових дизелів / Р.А. Варбанець, Ю.Н. Кучеренко, В.І. Кирнац // Авіаційно-космічна техніка і технологія. Науково-технічний журнал. Харків, Національний аерокосмічний університет ім. Н.Є. Жуковського «ХАІ» - 2014. – № 6 (113). – С. 75–79. (*Наукометричні бази: eLIBRARY.RU, Index Copernicus, CiteFactor, AcademicKeys, Infobase Index, WordCat, Google Scholar*).

*Здобувач брав участь у постановці експерименту, обробці даних моніторингу та формуванні висновків. Здійснював експериментальну перевірку розроблених ним методів комплексного діагностичного контролю робочого процесу транспортних дизелів. Виконував аналіз і добірку методів вібродіагностики поршневих двигунів.*

3. Варбанець Р.А. Моніторинг робочого процесу і параметрична діагностика середньообертового тепловозного дизеля К6S310DR / Р.А. Варбанець, В.С. Губін, В.І. Кирнац, О.А. Россомаха, Н.І. Александровська // Вісник АГТУ. Сер.: Морська техніка і технологія. – 2014. – № 2. – С. 108. (*Наукометричні бази: Ulrich's Periodicals Directory, DOAJ(Швеція), Academic Search Research & Development, EBSCO Publishing(США), РИИЦ*)

*Внесок дисертанта: Методологія комплексного діагностичного контролю дизеля тепловоза, включаючи систему газотурбінного наддуву.*

*Планування експерименту по комплексному діагностичному контролю тепловозного дизеля K6S310DR. Збір експериментальних даних за допомогою системи D4.0H та аналіз результатів діагностування. Математична обробка даних. Формування звітів.*

4. Варбанець Р.А. Визначення параметрів робочого процесу та діагностика головних середньообертових дизелів т/х «GREIFSWALD» / Р.А. Варбанець, Е.В. Белоусов, В.П. Савчук, В.І. Кирнац // Двигуни внутрішнього згоряння. Науково-технічний журнал. Харків: НТУ «ХПІ». – 2015. – №1. – С. 92. (Наукометричні бази:Ulrich`sPeriodicalsDirectory(USA), GoogleScholar, WorldCat, DOAJ, BASE(Германия), DRIVER)

*Внесок дисертанта: математичне моделювання робочого процесу дизеля в середовищі AVL BOOST та аналіз результатів діагностування.*

5. Варбанець Р.А. Технологічні карти наукових досліджень в задачах моніторингу та параметричної діагностики суднових дизелів / Р.А. Варбанець, Ю.Н. Кучеренко, В.І. Кирнац, Е.І. Жолтіков // Вісник Астраханського державного технічного університету. Серія: Морська техніка і технологія. Астрахань. - 2016. – № 1.– С. 47–59. (Наукометричні бази:Ulrich's Periodicals Directory, DOAJ(Швеція), Academic Search Research & Development, EBSCO Publishing(США), РИНЦ)

*Здобувачем розроблена і проаналізована технологічна карта наукових досліджень в області комплексного діагностичного контролю робочого процесу середньообертових суднових і тепловозних дизелів.*

## ПУБЛІКАЦІЇ В ЯКИХ ДОДАТКОВО ВИКЛАДЕНО ЗМІСТ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Варбанець Р.А. Аналіз можливості вібродіагностики технічного стану суднових дизелів / Р. А. Варбанець, Ю. М. Кучеренко, В. І. Кирнац // XIX Міжнародний Конгрес Двигунобудівників, 14-19 вересня 2014р. – Харків: Національний аерокосмічний університет ім. Н.С. Жуковського «ХАІ»; Національний технічний університет «ХПІ»; Чорноморський державний університет ім. Петра Могили; Національний університет кораблебудування ім. адмірала Макарова. Секція: «Поршневі двигуни внутрішнього згоряння», 2014. – С. 25-27.

2. Кирнац В.І. Моніторинг робочого процесу і параметрична діагностика середньообертового тепловозного дизеля K6S310DR / В. І. Кирнац, Р. А. Варбанець, В. Г. Івановський, А. А. Сторчак // Сучасні енергетичні установки на транспорті і технології та обладнання для їх обслуговування. Шоста міжнародна науково-практична конференція, 24-25 вересня 2015 р. – Херсон: Херсонська державна морська академія. Секція 1: «Проблеми експлуатації енергетичних установок і допоміжного обладнання на транспорті», 2015. – С. 10-12.

3. Кирнац В.І. Моніторинг робочого процесу і параметрична діагностика середньообертового дизеля / В. І. Кирнац, Р. А. Варбанець, В. Г. Івановський // Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті.

Сьома міжнародна науково-практична конференція, 26-28 травня 2015 р. – Херсон: Херсонська державна морська академія. Секція : «Контроль, діагностика і прийняття рішень при управлінні рухомими об'єктами», 2015. – С. 20-22.

4. Кирнац В.І. Підвищення економічності та покращення екологічних характеристик тепловозних дизелів K6S310DR / В. І. Кирнац, Р.А. Варбанець, Ю. М. Кучеренко, Е. І. Жолтіков // Екологічна безпека як основа сталого розвитку суспільства. Європейський досвід і перспективи. Друга міжнародна науково-практична конференція, 4-6 листопада 2015р. – Львів: Львівський державний університет безпеки життєдіяльності. Секція 5: «Енергетична ощадність та екологічна безпека транспорту», 2015. – 260-261.

5. Варбанець Р.А. Визначення параметрів робочого процесу та діагностика головних середньооборотних дизелів т/х «GREIFSWALD» / Р. А. Варбанець, Е. В. Белоусов, В. П. Савчук, В. І. Кирнац // XX Міжнародний конгрес двигунобудівників, 05-10 вересня 2015р. – Харків: Національний аерокосмічний університет ім. Н.С. Жуковського «ХАІ»; Національний технічний університет «ХПІ»; Чорноморський державний університет ім. Петра Могили; Національний університет кораблебудування ім. адмірала Макарова. Секція: «Поршневі двигуни внутрішнього згорання», 2015. – 25-27.

6. Кирнац В.І. Комплексний діагностичний контроль середньооборотних дизелів стосовно до умов планових ремонтів / В. І. Кирнац, Р. А. Варбанець, В. Г. Івановський // Міжнародна науково-практична конференція, 30 квітня – 8 травня 2016 р. – Одеса-Батумі: Одеський національний морський університет. «Міжнародні транспортні коридори: вісь Захід-Схід та Шовковий шлях», 2016. – 41-43.

7. Варбанець Р.А. Технологічні карти наукових досліджень в задачах моніторингу та параметричної діагностики суднових дизелів / Р. А. Варбанець, Ю. М. Кучеренко, В. І. Кирнац, Е. І. Жолтіков // Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті. Восьма міжнародна науково-практична конференція, 24-26 травня 2016 р. – Херсон: Херсонська державна морська академія. Секція : «Системний аналіз та математичне моделювання складних об'єктів», 2016. – 10-12.

## АНОТАЦІЯ

**Кирнац В.І. Комплексна експлуатаційна параметрична діагностика робочого процесу транспортних дизелів. - На правах рукопису.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.22.20 - Експлуатація та ремонт засобів транспорту. - Одеський національний морський університет. - Одеса 2018.

Дисертація присвячена дослідженню і розробці методів параметричної діагностики робочого процесу транспортних дизелів, експлуатація яких пов'язана з частими змінами навантаження і тривалою роботою на часткових режимах. Такі режими експлуатації призводять до інтенсивного зносу циліндропоршневої групи, паливної апаратури високого тиску і механізму газорозподілу разом з системою турбонаддуву. Відомо, що робота транспортних дизелів в першу чергу залежить від технічного стану паливної апаратури високого тиску і системи наддуву. Нерівномірність потужностей, викликана експлуатаційними дефектами паливної апаратури, призводить до перевантаження окремих циліндрів і підвищеної вібрації двигуна. Як наслідок, відбувається обмеження потужності всього двигуна і його робота відбувається в зоні підвищеного питомої витрати палива. Підвищується ймовірність аварійної зупинки двигуна. Ефективна експлуатація двигуна базується на постійному контролі основних, найбільш значущих параметрів робочого процесу.

Математичне моделювання робочого процесу транспортних дизелів в середовищі AVL BOOST дозволило зробити верифікацію методів діагностичного контролю, що застосовуються в експлуатації. У AVL BOOST використана модифікована модель закону професора Семенова В.С. - двофазна модель тепловиділення, яка дозволила спростити аналіз індикаторних показників при збереженні високої якості моделювання на часткових навантажувальних режимах. Максимальна відносна похибка при моделюванні транспортних дизелів на режимах 25%, 50%, 100% і 110% не перевищувала 3%.

Для вирішення завдання синхронізації розроблений і застосований комбінований аналітичний метод синхронізації даних моніторингу параметрів робочого процесу транспортних дизелів, який об'єднує переваги методу аналізу першої похідної кривої тиску в циліндрі і моделювання кривої стиснення-розширення за допомогою функції Аньезі. В умовах реостатних випробувань і скороченого часу перед- і післяремонтної діагностики дизелів новий метод дозволив на 50-80% зменшити похибки синхронізації і подальшого розрахунку індикаторних параметрів робочого процесу. Розроблений метод актуальний у зв'язку з тим, що більша частина транспортних дизелів працюють з ранніми кутами випередження подачі палива (від 12 і до 27° повороту колінчастого вала до верхньої мертвої точки поршня). У цьому випадку застосування тільки одного з аналітичних методів

неефективно і призводить до помилок синхронізації. Комбінація двох методів вирішила цю проблему, скоротивши число помилкових розрахунків при діагностуванні.

Отримав подальший розвиток метод контролю робочого процесу транспортного двигуна, що включає віброакустичний контроль подачі палива і газорозподілу за рахунок контролю фаз. Удосконалено метод аналізу спектра віброакустичних сигналів компресора газотурбонагнітача, в зв'язку з чим стала можливою вібродіагностика газотурбонагнітача.

Розроблені методи комплексної параметричної діагностики можуть бути широко впроваджені в практику експлуатації транспортних дизелів. Комплексний підхід, що полягає в діагностиці технічного стану циліндропоршневої групи, паливної апаратури високого тиску, механізму газорозподілу і газотурбонагнітача, в поєднанні з оперативністю отримання діагностичної інформації, значно підвищує ефективність і якість ремонтних робіт. Застосування розроблених методів сприяє загальному зниженню експлуатаційних витрат на 25-30% протягом всього життєвого циклу транспортних дизелів.

**Ключові слова:** транспортні дизелі, моделювання, параметри робочого процесу, газотурбонагнітач, спектральний аналіз, параметрична діагностика.

## ANNOTATION

**Kyrnats V.I. Complex operational parametrical diagnostics of the working process of transport diesel engines. – Manuscript.**

Thesis for the degree of Candidate of Technical Sciences in specialty 05.22.20 - Operation and repair of vehicles. - Odessa National Maritime University. - Odessa, 2018.

The thesis is devoted to the research and development of methods for parametric diagnostics of the working process of transport diesel engines, the operation of which is associated with frequent changes in load and prolonged operation in shared modes. Such operating modes lead to intensive wear of the cylinder-piston group, high-pressure fuel equipment and the timing mechanism together with the turbo system. It is known that the work of transport diesel engines primarily depends on the technical condition of the high-pressure fuel equipment and the boost system. The unevenness of capacity caused by operational defects in fuel equipment leads to overloading of individual cylinders and increased vibration of the engine. As a consequence, the power of the entire engine is limited and its operation takes place in the zone of increased specific fuel consumption. Increases the probability of an emergency engine stop. Effective operation of the engine is based on constant monitoring of the main, most significant parameters of the working process.

Mathematical modeling of the working process of transport diesel engines in the AVL BOOST environment made it possible to verify the diagnostic control

methods used in operation. In AVL BOOST the modified model of the law of professor Semenov VS is used. - a two-phase model of heat release, which made it possible to simplify the analysis of indicator indicators while maintaining high quality of modeling on shared load regimes. The maximum relative error in modeling of transport diesels at the modes 25%, 50%, 100% and 110% not exceeded 3%, accepted in engineering practice and the corresponding errors in the data provided in the technical documentation of transport diesels.

To solve the synchronization problem, a combined analytical method for synchronizing the monitoring data of the working parameters of the transport diesels was developed and applied, which combines the advantages of the method of analyzing the first derivative of the pressure curve in the cylinder and the simulation of the compression-expansion curve using the function of Anyesi. In the conditions of reduced time of pre- and post-repair diagnostics of diesel engines, the new method allowed reducing errors of synchronization and subsequent calculation of the indicator parameters of the working process by 50-80%. The developed method is actual in connection with the fact that the majority of transport diesels work with early angles of advancing fuel delivery (from 12 and up to 27 ° rotation of the crankshaft to the top dead point of the piston). In this case, the use of only one of the analytical methods is inefficient and leads to synchronization errors. The combination of the two methods solved this problem by reducing the number of erroneous calculations in the diagnosis.

The method of monitoring the working process of the transport engine has been further developed, including a vibro-acoustic control of fuel supply and gas distribution due to phase control. The method for analyzing the spectrum of vibro-acoustic signals of the gas turbocharger compressor has been improved, and therefore the vibration turbine diagnostics of the gas turbocharger became possible.

The developed methods of complex parametric diagnostics can be widely introduced into the practice of operating transport diesels. The complex approach, which consists in diagnosing the technical condition of the cylinder-piston group, high-pressure fuel equipment, gas distribution mechanism and gas turbocharger, in combination with the speed of obtaining diagnostic information, significantly improves the efficiency and quality of repair work. The application of the developed methods contributes to a general reduction in operating costs by 25-30% during the whole life cycle of transport diesel engines.

**Key words:** transport diesels, modeling, working process parameters, gas turbocharger, spectral analysis, parametric diagnostics.