

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ОДЕСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ МОРСЬКИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Маулевич Владислав Олегович



УДК 621.436:629.128.6

**ВИЗНАЧЕННЯ ОСНОВНИХ ДІАГНОСТИЧНИХ  
ПАРАМЕТРІВ РОБОЧОГО ПРОЦЕСУ ТРАНСПОРТНИХ ДИЗЕЛІВ  
В ЕКСПЛУАТАЦІЇ**

05.22.20 – експлуатація та ремонт засобів транспорту

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Одеса – 2020

Дисертація на правах рукопису.

Робота виконана в Одеському національному морському університеті  
Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор  
**Варбанець Роман Анатолійович**,  
Одеський національний морський університет,  
завідувач кафедри «Суднові енергетичні  
установки і технічна експлуатація»  
(ОНМУ, м. Одеса)

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор  
**Тимошевський Борис Георгійович**,  
Національний університет кораблебудування  
ім. адмірала Макарова, завідувач кафедри  
«Двигуни внутрішнього згоряння, установки і  
технічна експлуатація»  
(НУК, м. Миколаїв)

кандидат технічних наук, доцент  
**Савчук Володимир Петрович**,  
Херсонська державна морська академія,  
завідувач кафедри «Експлуатація суднових  
енергетичних установок»  
(ХДМА, м. Херсон)

Захист дисертації відбудеться 26 листопада 2020 року о 13:00 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 23 жовтня 2020 року.

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



Олексій Дрожин

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Завдання, поставлене практикою експлуатації транспортних дизелів, полягає в необхідності розробки та вдосконалення методів визначення основних параметрів робочого процесу, що дозволяють здійснювати ефективну діагностику технічного стану транспортних дизелів в процесі експлуатації.

Вирішення цієї наукової задачі полягає в розробці методів визначення основних параметрів робочого процесу шляхом аналізу індикаторних діаграм і вібродіаграм паливної апаратури високого тиску за методикою, яка застосовується в системах DEPAS D4.0H.

Для визначення основних параметрів робочого процесу пропонується використовувати тільки аналіз визначених під час експлуатації індикаторних діаграм і вібродіаграм паливної апаратури високого тиску. Причому необхідно враховувати, що при чисельному диференціюванні багаторазово підвищується рівень шумів, пов'язаний з похибками вимірювання сигналів і їх дискретним поданням. Вплив шумів при аналізі першої похідної значно підвищує похибку визначення параметрів, пов'язаних з нею. Визначення параметрів, пов'язаних з аналізом похідних вищих порядків, взагалі неможливо без застосування спеціальних методів цифрової фільтрації. Методи визначення основних параметрів робочого процесу транспортних дизелів в умовах експлуатації, які застосовувалися раніше, не дозволяють досить ефективно вирішувати ці завдання. Повинні бути розроблені нові методи або вдосконалені існуючі, що становить суть актуальної наукової проблеми, вирішенню якої присвячена дана робота.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, грантами.** Дисертаційна робота пов'язана з науково-дослідною тематикою кафедри «Суднові енергетичні установки і технічна експлуатація» судномеханічної спеціальності Одеського національного морського університету. В період 2013, 2014, 2017 по 2020 рр. автор брав участь у розробці держбюджетних науково-дослідних робіт «Удосконалення технічної експлуатації суднових енергетичних установок» ГР № 0215U001681 від 17.01.2013, ГР № 0215U004492 від 05.03.2014, ГР № 0216U000617 від 29.12.2017 та «Підвищення ефективності експлуатації суднової енергетичної установки» за 2018-2020 рр. в якості виконавця розділів, присвячених методам діагностики та визначення ефективних параметрів суднових дизельних енергетичних установок.

**Мета і завдання дослідження.** Метою дослідження є розробка методів визначення основних параметрів робочого процесу, найбільш значущих при діагностуванні технічного стану транспортних дизелів в процесі експлуатації: індикаторної потужності і середнього індикаторного тиску, частоти обертання, затримки запалення палива в робочому циліндрі і фази самозаймання палива.

Для досягнення мети в роботі поставлені такі основні завдання:

- аналіз існуючих методів контролю основних параметрів робочого процесу транспортних дизелів в умовах експлуатації;
- розробка методу визначення фази початку згоряння в циліндрі шляхом чисельної обробки індикаторної діаграми;
- розробка методу визначення затримки самозаймання палива в робочому циліндрі шляхом аналізу фази початку згоряння і вібродіаграм вприскування палива;

- удосконалення методу розрахунку частоти обертання колінчастого валу шляхом аналізу часових діаграм тиску в робочому циліндрі, що в подальшому дозволяє підвищити точність визначення індикаторної потужності;

- удосконалення методу визначення середнього індикаторного тиску в робочому циліндрі – по розгорнутим індикаторним діаграмам.

**Об'єктом дослідження** є робочий процес транспортних дизелів.

**Предметом дослідження** є розробка методів моніторингу параметрів робочого процесу, які необхідні для якісного діагностичного контролю технічного стану транспортних дизелів в експлуатації.

**Методи дослідження.** Дисертаційне дослідження базується на основних положеннях теорії двигунів внутрішнього згоряння. Для визначення основних параметрів робочого процесу використовуються методи чисельного диференціювання, цифрової фільтрації на базі дискретного перетворення Фур'є, методи кореляційного і регресійного аналізу експериментальних даних.

В експериментах використовувалися методи визначення параметрів робочого процесу судових дизелів за допомогою систем моніторингу DEPAS D4.0H і методи комп'ютерного моніторингу основних параметрів робочого процесу транспортних дизелів. При розробці алгоритмів використовувалося програмне середовище *Delphi* і її сучасні версії з використанням математичних бібліотек *Numeric Toolbox* і методів нелінійного програмування. Для візуалізації даних і побудови регресійних моделей використовували середовище *Golden Software Grapher 7.0*.

**Наукова новизна отриманих результатів** полягає в тому, що:

- вперше розроблено метод розрахунку фази початку згоряння в циліндрі транспортного дизеля по максимуму другої похідної індикаторної діаграми тиску, згладженої фільтром низьких частот *Butterworth*, який на відміну від існуючих методів дозволяє забезпечити абсолютну похибку менше 0,5 градуса повороту колінчастого валу (°ПКВ), що є вдвічі точнішим за існуючі методи;

- вперше запропонований метод визначення затримки самозаймання палива в робочому циліндрі, що використовує фази підйому голки форсунки і початку згоряння, який на відміну від існуючих методів дозволив знизити відносну похибку до 3%, що є прийнятним в режимі експлуатації;

- удосконалено метод визначення частоти обертання колінчастого валу по періоду робочого циклу між центрами інтервалів від фази закриття впускних клапанів до фази початку згоряння, який на відміну від існуючих методів не залежить від нерівномірності фази максимального тиску згоряння;

- удосконалено метод визначення середнього індикаторного тиску в робочому циліндрі шляхом визначення площ елементарних ділянок індикаторної діаграми для розрахунку середніх тисків на них, що дозволило знизити відносну похибку середнього індикаторного тиску і індикаторної потужності до 2,5%, що співпадає з вимогами морських сертифікаційних товариств. На відміну від існуючих, вдосконалений метод не залежить від частоти дискретизації запису індикаторних діаграм.

Обґрунтованість наукових результатів, висновків і рекомендацій, що містяться в роботі, обумовлена використанням коректних математичних моделей і чисельних методів розв'язання задач обробки експериментальних даних. Достовірність наукових

результатів роботи підтверджена відповідністю, з допустимою похибкою, результатам морських натурних випробувань (Sea Trials) розрахункових значень параметрів робочого процесу.

**Практичне значення** результатів дисертаційного дослідження полягає в розробці методів контролю параметрів робочого процесу, найбільш значущих для достовірної діагностики технічного стану транспортних дизелів в умовах експлуатації. Розроблені алгоритми використані при оновленні програмного забезпечення системи моніторингу DEPAS D4.0H, яка широко застосовується на морських суднах, в системі дизельних депо «Укрзалізниця» і на берегових дизельних електростанціях. Запропоновані методи є альтернативою дорогим прямим методам визначення основних параметрів робочого процесу в експлуатації за допомогою ряду відомих діагностичних систем (NK-100, NK-200 Autronica A/S, Doctor DK-20, Malin 6000 і т. п.).

У дисертації були розроблені наступні практичні методи визначення параметрів робочого процесу транспортних дизелів в експлуатації: фази початку згоряння і частоти обертання колінчастого валу з подальшим визначенням затримки запалення палива; середнього індикаторного тиску і індикаторної потужності. Підвищено точність визначення зазначених параметрів при експлуатації транспортних дизелів, що відображено у висновках.

Результати дисертації впроваджені:

- на суднах судноплавної компанії «TRANSSHIP» (Україна), отримано акт впровадження;
- на суднах судноплавної компанії «Anglo-Eastern Ukraine» (Україна), отримано акт впровадження.

Наукоємність отриманих результатів та їх спрямованість на детальний аналіз робочого процесу дозволяють використовувати їх у навчальному процесі спеціалізованих технічних вищих навчальних закладів. У зв'язку з цим результати дисертаційного дослідження впроваджені в навчальний процес кафедри суднових енергетичних установок і технічної експлуатації (СЕУ і ТЕ) Одеського національного морського університету і використовуються при читанні лекцій з дисципліни «Системи діагностування» для студентів старших курсів судномеханічної спеціальності. Результати дослідження також можуть бути використані у судноплавних компаніях при підготовці морських інженерів.

**Особистий внесок автора.** Усі результати, винесені на захист, отримані автором особисто. Дисертація є самостійним дослідженням і оформлена у вигляді рукопису, написаної автором особисто. У спільних роботах автору належать положення, зазначені в списку опублікованих праць.

У спільних роботах [1–2] здобувач брав участь у підготовці експерименту і обробці експериментальних даних. Здійснював перевірку розроблених ним методів діагностування технічного стану суднових дизелів за параметрами робочого процесу, визначених в експлуатації. У роботі [3] здобувач брав участь у обробці даних моніторингу, аналізі параметрів робочого процесу та формуванні висновків. Проводив аналіз даних Sea Trials і здійснював перевірку розроблених ним методів визначення основних параметрів робочого процесу судового дизеля в експлуатації. У роботі [4] здобувач брав участь в обробці даних експериментальних досліджень і аналізі параметрів

робочого процесу, обраних для діагностики технічного стану суднових дизелів. У роботах [5–6] здобувачем здійснено підготовку даних, вибір і побудову функціоналів для проведення процедури мінімізації. У роботі [7] здобувачем зроблено аналіз результатів нелінійної n-параметричної мінімізації в задачах розрахунку робочого процесу суднових двигунів.

**Апробація результатів дисертації.** Основні результати дисертаційного дослідження доповідалися на 11-ти міжнародних науково-технічних конгресах і конференціях у містах: Коблево [8, 11, 16], Миколаїв [10, 18], Київ [14], Херсон [9, 12, 15, 17]; та на поромі «Каунас» рейсом Одеса – Стамбул – Одеса. Результати дисертаційного дослідження були представлені доповідями, були обговорені і отримали схвальну оцінку. Тези доповідей було опубліковано у відповідних збірках.

**Публікації.** За темою дисертації опубліковано 18 наукових робіт, 7 з них у спеціалізованих науково-технічних виданнях, рекомендованих МОН України для публікації результатів дисертаційних досліджень і включених у наукометричні бази даних. Стаття 2019 р. опублікована в науковому виданні «Diagnostyka. Polish society of technical diagnostics», індексованому в SCOPUS.

**Структура і обсяг роботи.** Дисертація складається зі вступу, 4 розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг роботи становить 256 стор., у тому числі 65 рисунків і 25 таблиць. Список використаних джерел становить 112 найменувань на 13 сторінках, 4 додатка на 82 аркушах. У додатку наведені акти впровадження результатів дисертаційного дослідження.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

**У вступі** викладено актуальність теми дисертаційного дослідження та її зв'язок з науковими програмами, сформульовано мету і завдання дослідження, обґрунтована наукова новизна і показано практичне значення отриманих результатів, показаний особистий внесок здобувача, наведені дані апробації результатів дисертаційного дослідження.

**У першому розділі** дано аналіз стану проблеми і досліджено шляхи її вирішення. На підставі аналізу робіт вітчизняних і зарубіжних авторів (Івановський В. Г., Фомін Ю. Я., Семенов В. С., Варбанець Р. А., Stefan Neumann, Klaas Visser, Douwe Stapersma та ін.) літературних джерел виділено методи визначення основних параметрів робочого процесу, що відповідають за достовірну та ефективну діагностику технічного стану транспортних дизелів в умовах експлуатації. За основу прийнята методика, застосована в системах DEPAS D4.0H, розроблених на кафедрі СЕУ і ТЕ ОНМУ.

Для визначення вказаних параметрів використовується аналіз індикаторних діаграм і вібродіаграм паливної апаратури високого тиску за методикою, прийнятою в системах DEPAS D4.0H. Шуми при аналізі похідних, отриманих методами чисельного диференціювання, підвищують похибку визначення параметрів. У зв'язку з цим застосовано цифровий фільтр *Butterworth* на базі дискретного перетворення Фур'є.

Амплітудно-частотна характеристика (АЧХ) фільтра *Butterworth* – монотонно спадна функція частоти, максимально гладка на частотах смуги пропускання, вона знижується практично до нуля на частотах смуги зменшення (рис. 1).

$$G(f) = \frac{G_0}{\sqrt{1+(f/f_c)^{2j}}}, \quad (1)$$

де  $G_0$  – коефіцієнт посилення,  $f_c$  – частота зрізу,  $j$  – порядок фільтра.

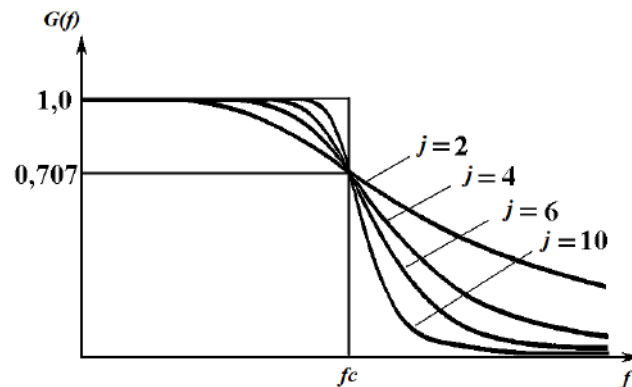


Рис. 1. АЧХ фільтрів *Butterworth* нижніх частот порядків 2, 4, 6, 10 ( $G_0 = 1$ )

Фільтр *Butterworth* – єдиний з фільтрів, що зберігає форму АЧХ для більш високих порядків, тоді як багато інших різновидів фільтрів (фільтр Бесселя, фільтр Чебишева та ін.) мають різні форми АЧХ при різних порядках. Для нескінченних значень порядку  $j$  АЧХ стає прямокутною функцією, і частоти нижче частоти зрізу  $f_c$  будуть пропускатися з коефіцієнтом посилення  $G_0$ , а частоти вище частоти зрізу будуть повністю подавлятися. Основні параметри фільтра: частота зрізу  $f_c$ , порядок  $j$  і коефіцієнт посилення  $G_0$  – визначаються для кожного конкретного типу двигуна так, щоб співвідношення експериментальних (Sea Trials) і розрахункових значень середнього індикаторного тиску і індикаторної потужності циліндрів була не більше 2%.

До застосування фільтра *Butterworth* аналіз першої, а тим більше другої похідних не представляється можливим внаслідок значних шумів, що з'являються після чисельного диференціювання кривої тиску  $P(\varphi)$ . Незважаючи на високу якість датчиків *IMES GmbH*, які використовуються в процесі досліджень, цифрові і аналогові шуми багаторазово посилюються в результаті чисельного диференціювання (рис. 2 а, б).

Після застосування фільтра *Butterworth* можливо проводити аналіз першої та другої похідних на екстремуми (рис. 3). Так, перший екстремум кривої  $P'$  показує максимальну швидкість підвищення тиску на ділянці стиснення, другий – на ділянці згоряння. Локальний мінімум між екстремумами показує падіння швидкості зміни тиску між двома різнорідними процесами: стиснення і згоряння. Координати локальних екстремумів використовуються при вирішенні задачі синхронізації даних та уточнення розрахунку верхньої мертвої точки поршня, як показано в спільній статті автора (S. Neumann, V. Maulevych, ...). Максимум другої похідної (див. рис. 3) використовується в цьому дослідженні для визначення тиску і фази початку згоряння в циліндрі.

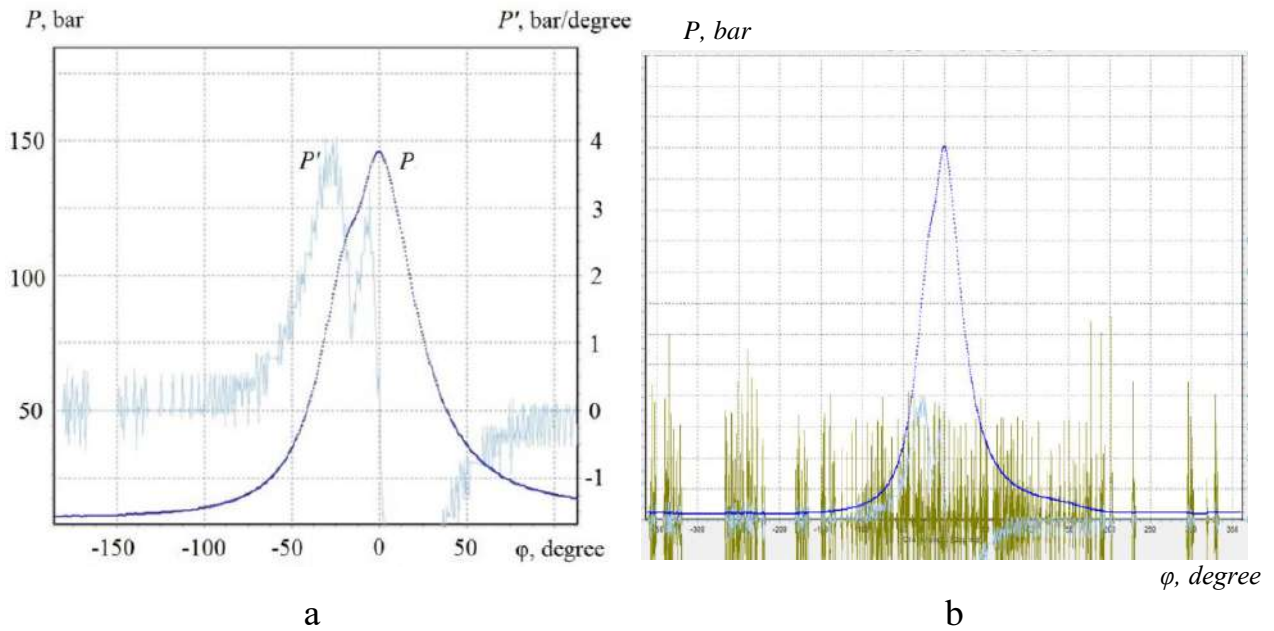


Рис. 2. Результати чисельного диференціювання індикаторних діаграм, отриманих за допомогою датчиків тиску *IMES GmbH*:  
а – перша похідна, б – друга похідна

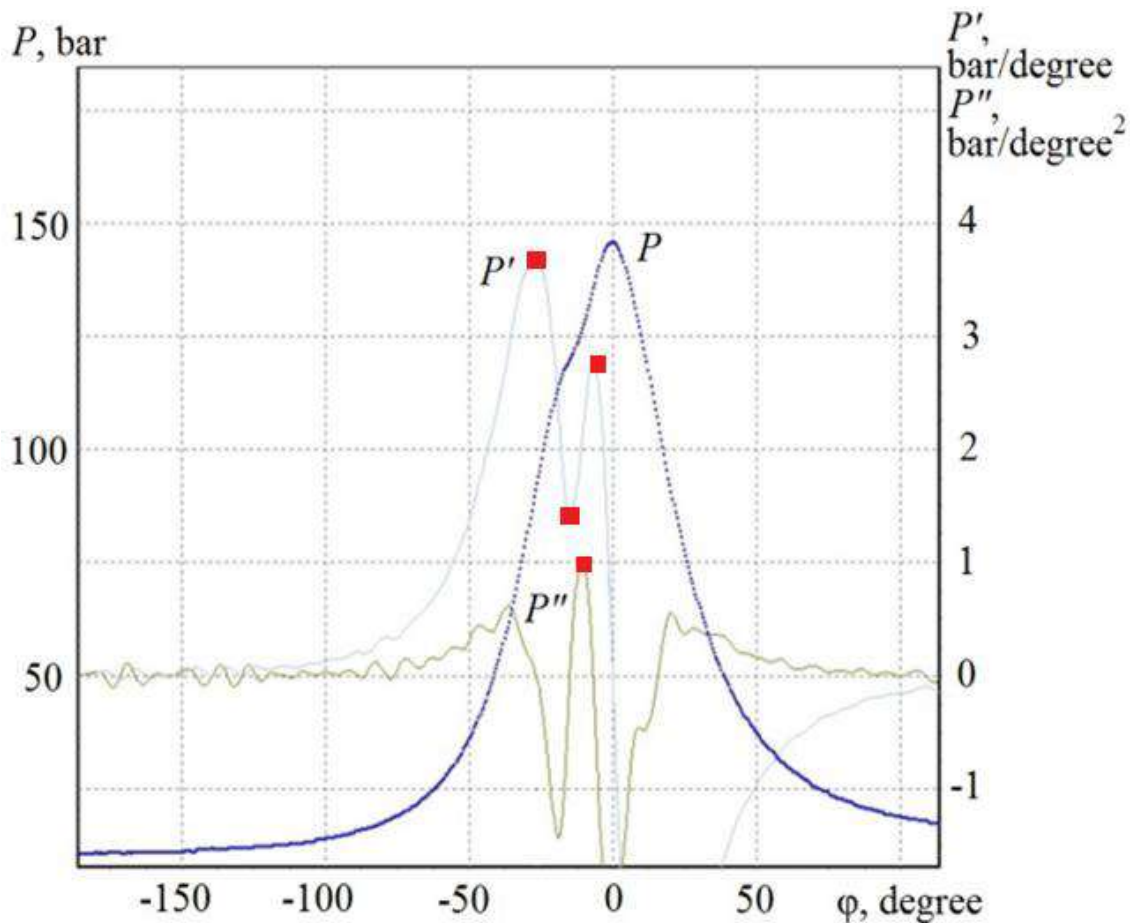


Рис. 3. Результати чисельного диференціювання індикаторних діаграм (перша  $P'$  і друга  $P''$  похідні) із застосуванням фільтра *Butterworth*



У другому розділі були розроблені методи визначення фази початку згоряння в робочому циліндрі  $\varphi P'_c$ , затримки запалення палива  $\tau_D$  і частоти обертання колінчастого валу двигуна  $n(RPM)$  без використання апаратних фазових датчиків на маховику за допомогою аналізу часових діаграм  $P(t)$ .

На рис. 4 показані діаграми робочих процесів (криві 1, 2, 3) при різних кутах випередження впорскування палива і діаграма стиснення-розширення (крива 0). У момент самозаймання відбувається "відрив" кривої згоряння від діаграми стиснення (точки  $p'_{c1}, p'_{c2}, p'_{c3}$ ). У більшості випадків, коли вимірювання тиску в циліндрі відбувається без хвильових спотворень і дросельного ефекту трубки індикаторного крану, в цей момент на діаграмі тиску з'являється характерний перегин, який свідчить про різке наростання тиску при згорянні.

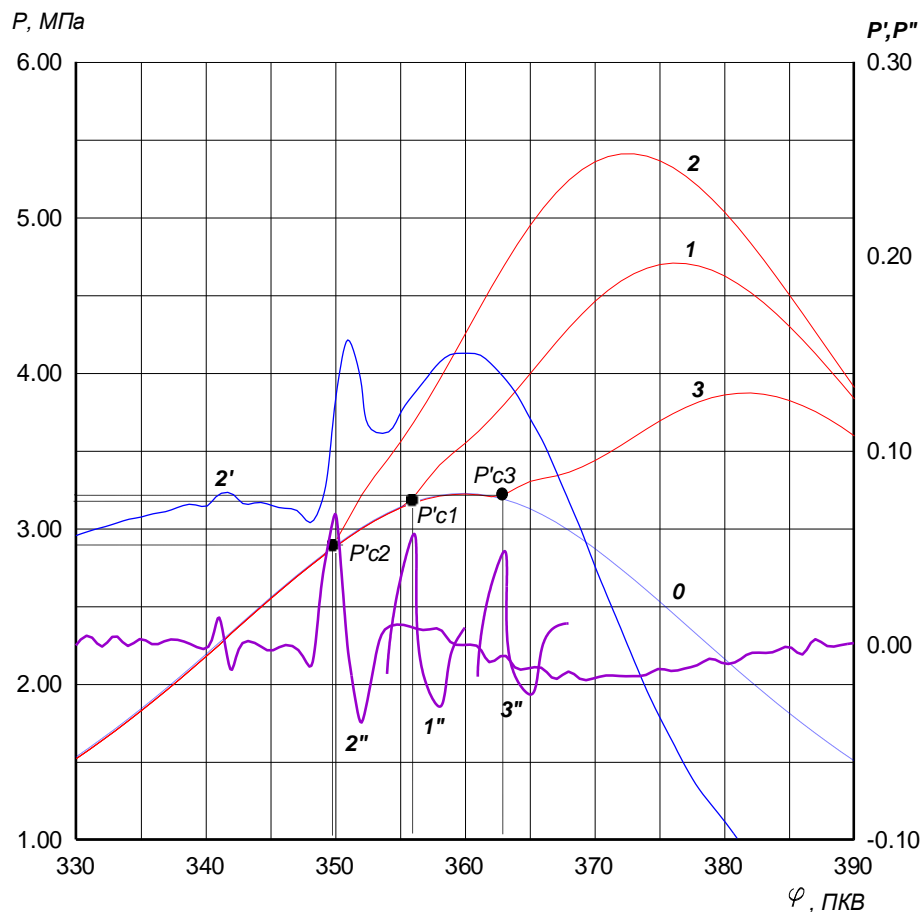


Рис. 4. Визначення фази початку згоряння  $\varphi P'_c$  в робочому циліндрі за координатами максимумів других похідних  $P''(\varphi)$ : 0 – стиснення-розширення без згоряння; 1, 2, 3 –  $p(\varphi)$  – діаграми робочого процесу при різних кутах випередження впорскування палива; 2' – графік для робочого процесу 2; 1'', 2'', 3'' – графіки других похідних  $d^2 p / d\varphi^2$  відповідних робочих процесів

Характер зміни першої похідної  $dp/d\varphi$  (крива 2' для робочої діаграми 2) показує, що поблизу точок  $p'_{c1}, p'_{c2}, p'_{c3}$  вона має найкрутішу ділянку. Другі похідні  $d^2 p / d\varphi^2$  (криві 1'', 2'', 3'') мають максимуми в ординатах цих точок. Перша та друга похідні

визначаються методами чисельного диференціювання. Можна записати умову визначення кута моменту початку samozаймання палива:

$$\left(\frac{d^2 p}{d\varphi^2}\right)_{MAX} = \left(\frac{d^2 p}{d\varphi_{P'C}^2}\right). \quad (2)$$

Після визначення фази  $\varphi_{P'C}$  і тиску  $P'_{C}$  початку згоряння в робочому циліндрі стає можливим визначення одного з найважливіших параметрів, що характеризують технічний стан паливної апаратури високого тиску, – затримки запалення палива, рис. 5а.

Для визначення затримки запалення використовуються одночасно записані розгорнуті індикаторна і вібродіаграми (рис. 5б). Затримка займання визначається як різниця фаз між отриманою раніше фазою початку згоряння  $\varphi_{P'C}$  і фазою підйому голки на початку впорскування палива  $\alpha$  – дійсним кутом випередження впорскування палива.

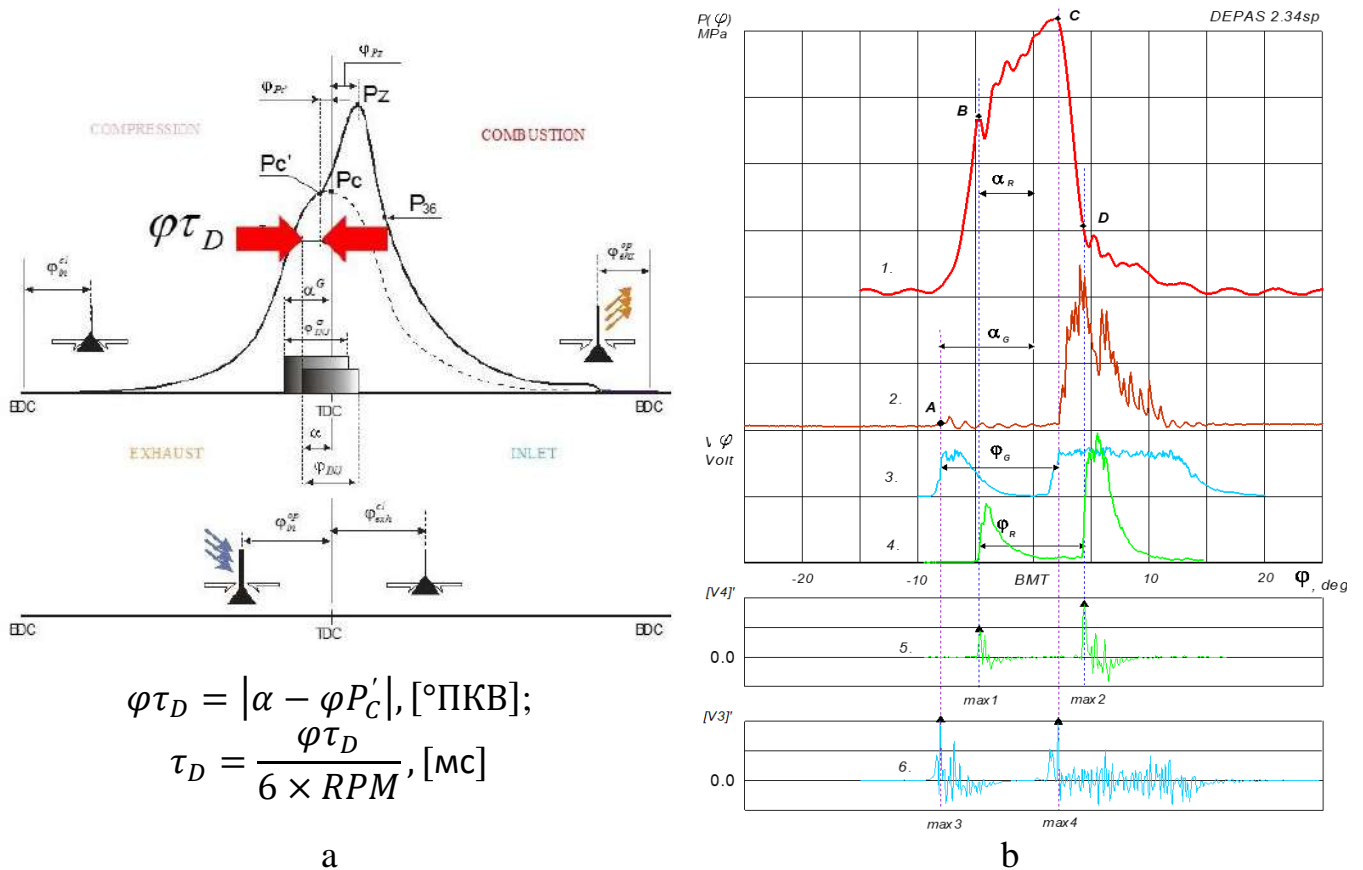


Рис. 5. Визначення затримки запалення палива

Діаграми отримані відповідно до методики, прийнятої в системах DEPAS D4.0H. При цьому робиться припущення про те, що основна маса впорскуваного палива приходить після виходу голки форсунки на верхній упор. З урахуванням такого припущення вказаний метод дає відносну похибку у визначенні затримки займання не більше 3%.

Фаза і час затримки займання палива характеризує якість утворення суміші в циліндрі, що, в свою чергу, однозначно характеризує технічний стан паливної апаратури високого тиску на всіх циліндрах і якість прийнятого бункера.

Для визначення частоти обертання колінчастого валу використовується той факт, що індикаторні діаграми записані в пам'ять комп'ютера у вигляді тимчасових реалізацій через дискретні часові інтервали  $\Delta x$ . В одному запису  $M$  точок, які описують  $N$  робочих циклів (рис. 6). Мінімально необхідна кількість максимумів робочих циклів  $P_{max}$  в запису – три. У цьому випадку, щонайменше, один робочий цикл (від нижньої мертвої точки до нижньої мертвої точки) і дві ділянки стиснення будуть представлені в записі повністю.

Відомо, що тиск на ділянках стиснення від  $p_a$  до  $p'_c$  підкоряється закону  $p = p_a \varepsilon^{n1}$ , тобто є гладкою монотонною зростаючою функцією, оскільки до  $p'_c$  ще немає згоряння палива. Таким чином, незалежно від якості протікання робочого процесу, можливої детонації в циліндрі, циклової нестабільності кута випередження вприскування палива і нерівномірності циклових подач палива, ці ділянки для декількох сусідніх циклів будуть майже однаковими для одного циліндра на сталому режимі роботи двигуна (див. рис. 6).

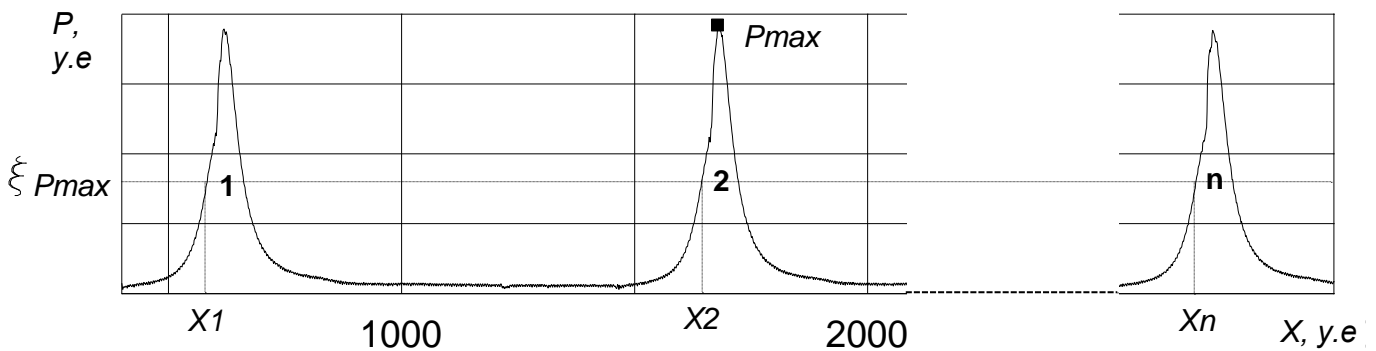


Рис. 6. Визначення частоти обертання колінчастого валу

Задамо рівень  $h = 0,5P_c$ , який забезпечує надійне проходження через середину ділянки стиснення. Визначимо значення множника  $\xi$ , при якому  $\xi p_{max}$  дорівнює тиску на середині ділянки стиснення:

$$\xi = 1 / (2\lambda), \quad (3)$$

де  $\lambda = P_z / P_c$  – ступінь підвищення тиску.

Для двигунів з низьким ступенем підвищення тиску (1,1÷1,2), наприклад, VASA R32, Low Nox, величину  $\xi$  потрібно вибирати з діапазону 0,4÷0,46, а для двигунів з високим  $\lambda = 2\div 2,5$ , наприклад, PIELSTICK, –  $\xi = 0,25\div 0,2$ . На кожній діаграмі на ділянці стиснення вибирається  $x_i$  так, що  $f(x_i) = P(x_i) = \xi p_{MAX}, i \geq 2$ . Тоді час одного робочого циклу в секундах можна підрахувати за формулою  $t_{m...} = (x_{i+1} - x_i) / v_{A...n}$ . Якщо в реалізації присутні  $n$  циклів, як показано на рис. 6, то час робочого циклу  $t_{P,Ц} = (x_n - x_0) / (n-1)v_{AIII}$ . Таким чином, частота обертання двигуна в хвилину дорівнює:

$$n = \frac{60}{t_{P.I.}}, \text{ об/хв.} \quad (4)$$

Необхідно відзначити, що дана методика визначення частоти обертання валу двигуна за періодом між робочими циклами не вимагає встановлення фазового датчика на маховику.

**Третій розділ** присвячений методам розрахунку середнього індикаторного тиску і індикаторної потужності робочих циліндрів.

Середній індикаторний тиск визначаємо методом прирощення об'ємів:

$$p_i = \frac{1}{V_s} \sum_{j=1}^m \bar{p}(V_{j+1} - V_j), \quad (5)$$

де  $V_s = \frac{\pi D^2}{4} S$  – робочий об'єм циліндра;  $S$ ,  $D$  – хід і діаметр поршня.

Поточний об'єм циліндра:

$$V_{ц} = V_c + 0.5V_s \left[ 1 + \frac{1}{\lambda_{ш}} - \cos \varphi - \frac{1}{\lambda_{ш}} \sqrt{1 - (\lambda_{ш} \sin \varphi)^2} \right], \quad (6)$$

де  $V_c$  – об'єм камери стиснення;

$\lambda_{ш} = S / 2L_{ш}$  – відношення радіуса кривошипа колінчастого валу до довжини шатуна між осями його підшипників.

Середній тиск на ділянці визначається як площа елементарної ділянки, поділена на його основу (рис. 7):

$$\bar{p} = \frac{S_j}{(\varphi_{j+1} - \varphi_j)}. \quad (7)$$

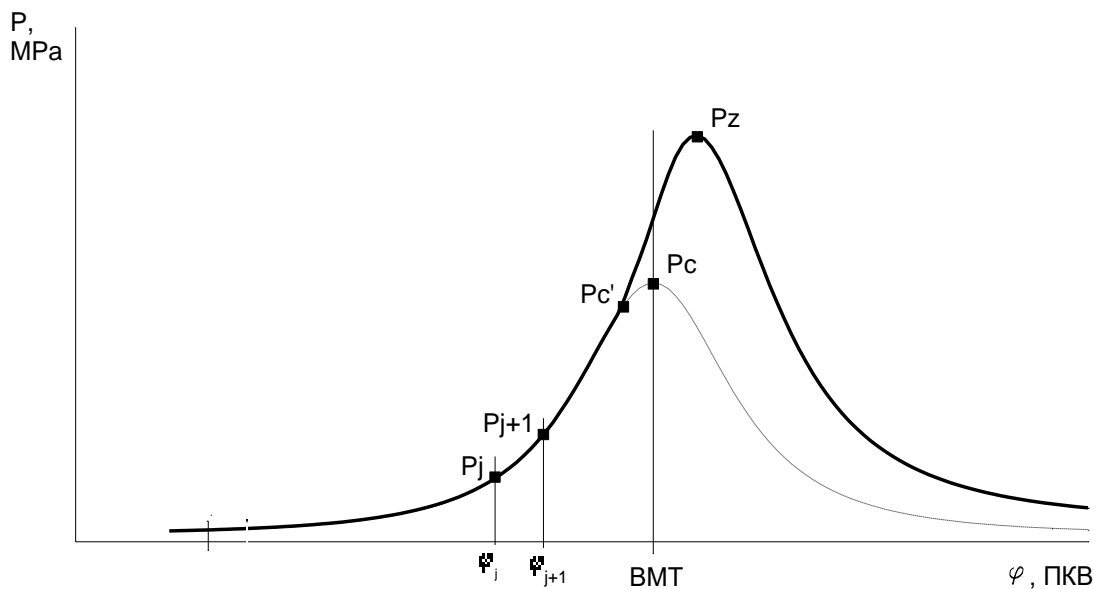


Рис. 7. До питання визначення середнього індикаторного тиску методом прирощення об'ємів

Площа елементарної ділянки визначається за допомогою формули Сімпсона:

$$\int_a^b f(x)dx \approx \int_a^b p_2(x)dx = \frac{b-a}{6} \left( f(a) + 4f\left(\frac{a+b}{2}\right) + f(b) \right), \quad (8)$$

де  $p_2(x)$  – поліном другого порядку, апроксимуючий криву тиску на елементарній ділянці  $f(x)$ ;

$a, b$  – межі елементарної ділянки ( $a = \varphi_j, b = \varphi_{j+1}$ );

$f(a), f(b)$  – значення тисків на кордонах елементарної ділянки.

Можлива також модифікація формули Сімпсона, в якій поліном другого ступеня замінений на рівняння політропи стиснення  $P_c = P_a * \varepsilon^{n_1}$ , з попередньо заданими величинами тиску початку стиснення  $P_a$  і коефіцієнта політропи стиснення  $n_1$ . В якості значення тиску в кінці стиснення приймаємо його наближене значення – тиск на початку займання палива, визначене раніше при розрахунку фази початку згоряння в робочому циліндрі  $\varphi P'_c$ .

$$P_{comp} = P_{comp} \approx P'_c. \quad (9)$$

На відміну від традиційного методу, в якому середній тиск на елементарній ділянці визначався як середнє арифметичне тисків на границі ділянки  $\bar{p} = \frac{p_{j+1} + p_j}{2}$ , запропонований метод знижує остаточну похибку розрахунку до величини менш 2,5% для випадків, коли частота дискретизації при записі діаграм робочого процесу більше 1 °ПКВ. Така ситуація може бути актуальна для високооборотних транспортних дизелів.

Індикаторна потужність дизеля розраховується за формулою:

$$N_i = c_1 D^2 S n i p_i, \quad (10)$$

де  $c_1$  – коефіцієнт, що враховує тактність дизеля і розмірності вхідних величин для приведення результату до системи СІ ( $c_1 = 6,55$  для 4-тактних дизелів;  $c_1 = 13,1$  для 2-тактних дизелів);  $n$  – частота обертання колінчастого валу двигуна,  $\text{хв}^{-1}$ ;  $i$  – число циліндрів;

**Четвертий розділ** присвячений перевірці адекватності розроблених методів за допомогою математичної моделі робочого процесу дизеля, отриманої в середовищі AVL BOOST. Сама математична модель верифікована за даними ходових випробувань (Sea Trials) суден “FMG GRACE” з головним двигуном MAN B&W 6S70MC-C.8.1 і “MINERAL YANGFAN” з головним двигуном MAN B&W 6G70ME-C.9.2. Такий спосіб верифікації застосований для того, щоб мати можливість перевірки адекватності розроблених методів у всьому діапазоні зміни навантажувальних режимів двигуна, а не тільки в декількох контрольних точках, доступних за даними Sea Trials.

Верифікація моделі в середовищі AVL BOOST проводилася на режимах 25%, 50%, 75%, 100%. В основі моделювання лежить перший початок термодинаміки, записаний у вигляді:

$$\frac{d(m_c \cdot u)}{da} = -p_c \cdot \frac{dV}{da} + \frac{dQ_F}{da} - \sum \frac{dQ_w}{da} - h_{BB} \cdot \frac{dm_{BB}}{da} + \sum \frac{dm_i}{da} \cdot h_i - \sum \frac{dm_e}{da} \cdot h_e - q_{ev} \cdot f \cdot \frac{dm_{ev}}{dt}. \quad (11)$$

Зміну маси в циліндрі можна розрахувати з суми мас:

$$\frac{dm_c}{da} = \sum \frac{dm_i}{da} - \sum \frac{dm_e}{da} - \frac{dm_{BB}}{da} + \frac{dm_{ev}}{dt}, \quad (12)$$

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 у циліндрі;  $V$  – об'єм циліндра;  $Q_F$  – енергія палива;  $Q_w$  – втрата тепла від стінок;  $a$  – кут повороту колінчастого валу;  $dm_i$  – маса елементів, що надходять у циліндр;  $dm_e$  – маса елементів на виході з циліндра;  $h_i$  – ентальпія елементів, що надходять у 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 випарованого палива.

Для оцінки швидкості тепловиділення в циліндрі дизеля використовувалася трьохфазна модель В. С. Семенова:

$$\frac{dx}{d\varphi} = \frac{A_1}{\varphi_1} k_1 e^{-0.5k_1^2} + \frac{A_2}{\varphi_2} k_2 e^{-0.5k_2^2} + \frac{A_3}{\varphi_3} k_3 e^{-0.5k_3^2}, \quad (13)$$

де  $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$  – зміщення максимумів швидкості тепловиділення на кожній з трьох фаз;

$A_1, A_2, A_3, k_1, k_2, k_3$  – коефіцієнти навантажувального режиму, що залежать від кута повороту колінчастого валу.

Верифікація математичної моделі на режимах навантаження 25%, 50%, 75% та 100% показала, що сертифікований програмний комплекс AVL BOOST дозволяє з високою точністю моделювати робочий процес дизеля у всьому діапазоні навантажувальних режимів транспортних дизелів. Похибка моделювання основних параметрів робочого процесу транспортних дизелів щодо даних Sea Trials склала не більше 2% на всіх дольових режимах і режимі максимальної тривалої експлуатаційної потужності (MCR).

Результати перевірки адекватності розроблених методів показали, що максимальні відносні похибки визначення основних параметрів робочого процесу, необхідних для якісної та достовірної діагностики технічного стану транспортних дизелів, не перевищують 2,5÷3%.

З похибкою менше 1% визначається частота обертання колінчастого валу на кожному циклі двигуна. При цьому може проводитися оцінка циклової нерівномірності обертання колінчастого валу. Це актуально для всіх типів суднових дизелів і, в першу чергу, для малооберткових.

З урахуванням допущення про те, що основна фаза початку впрыскування доводиться на момент повного підйому голки форсунки, відносна похибка визначення затримки займання становить не більше 3%.

Відносна похибка визначення середнього індикаторного тиску становить менше 2%. При цьому сумарна відносна похибка визначення індикаторної потужності не перевищує 3%, що робить можливим подальший аналіз витрати палива транспортним дизелем і підвищує достовірність і якість діагностичних висновків.

## ВИСНОВКИ

У дисертаційному дослідженні вирішена поставлена практикою наукова задача розробки методів визначення основних параметрів робочого процесу, найбільш значущих для здійснення діагностичного контролю технічного стану транспортних дизелів в експлуатації. Представлені нові рішення задач визначення фази початку згоряння, затримки самозаймання палива, частоти обертання колінчастого валу, середнього індикаторного тиску і індикаторної потужності.

Отримані в роботі наукові та практичні результати дозволяють зробити наступні висновки.

1. Аналіз показав, що визначення основних параметрів робочого процесу транспортних дизелів, які є значущими для достовірної діагностики технічного стану, потребує доопрацювання і вдосконалення. Перед аналізом індикаторних діаграм і їх похідних першого і другого порядку необхідно застосувати цифрову фільтрацію даних на базі швидкого перетворення Фур'є.

2. Вперше розроблено метод розрахунку фази початку згоряння в циліндрі транспортного дизеля по максимуму другої похідної індикаторної діаграми із застосуванням фільтра низьких частот *Butterworth*, який дозволяє забезпечити абсолютну похибку менше 0,5 градуса повороту колінчастого валу.

3. Вперше запропоновано метод визначення затримки самозаймання палива в робочому циліндрі, що використовує фазу початку згоряння в циліндрі і фазу переднього фронту вібродіаграми форсунки, визначену за максимумом першої похідної вібродіаграми. Використано різні діаграми – індикаторна і вібродіаграма, причому фаза початку згоряння визначена за методом, вказаним вище, а фаза підйому голки визначена по максимуму першої похідної відповідного фронту вібродіаграми. З урахуванням допущення про те, що основна фаза початку впрыскування доводиться на момент повного підйому голки форсунки, вказаний метод дає відносну похибку у визначенні затримки запалення до 3%.

4. Метод розрахунку частоти обертання колінчастого валу удосконалений шляхом визначення періоду робочого циклу між центрами інтервалів фази закриття впускних клапанів і фази початку згоряння. Такий метод дозволяє з низькою відносною похибкою (менше 1%) визначити частоту обертання на кожному циклі двигуна і здійснювати оцінку циклової нерівномірності обертання колінчастого валу, що в подальшому дозволяє підвищити точність визначення індикаторної потужності за відносною похибкою до 2,5%. На відміну від існуючих, запропонований метод не залежить від циклової нерівномірності фази максимального тиску згоряння.

5. Удосконалено метод визначення середнього індикаторного тиску в робочому циліндрі шляхом визначення площ елементарних ділянок індикаторної діаграми для розрахунку середніх тисків на них. На відміну від існуючих, удосконалений метод не залежить від частоти дискретизації запису індикаторних діаграм. Для випадків, коли запис індикаторних діаграм робочого процесу здійснюється з кроком більше 1 градуса повороту колінчастого валу, метод знижує відносну похибку розрахунку середнього індикаторного тиску і індикаторної потужності до 2,5%.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

### Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Neumann S. Marine diesels working cycle monitoring on the base of IMES GMBH pressure sensors data / S. Neumann, R. Varbanets, O. Kyrylash, V. Maulevych, O. Yeryganov // Diagnostyka. Polish society of technical diagnostics. – 2019. – №20(2). – P. 19–26. (*Наукометричні бази: SCOPUS [CiteScore (2017): 1,01; SJR(SCImago Journal Rank) (2017): 0.356; SNIP(Source Normalized Impact per Paper) (2017): 0.864], Crossref, IndexCopernicus (ICV): 121.41, EBSCO, BazTech, WorldWideScience.org*).

*Здобувач брав участь у підготовці експерименту і обробці експериментальних даних. Здійснював перевірку розроблених ним методів діагностування технічного стану судових дизелів за параметрами робочого процесу, визначених в експлуатації.*

2. Ерыганов А. В. Влияние протечек рабочего тела на координату точки максимального роста давления сжатия / А. В. Ерыганов, Р. А. Варбанец, В. О. Маулевич // Авиационно-космическая техника и технология. Научно-технический журнал. Харьков, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ» – 2019. – №1(153). – С. 59–64. (*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 перевірку розроблених ним методів діагностування технічного стану судових дизелів за параметрами робочого процесу, визначених в експлуатації.*

3. Варбанець Р. А. Застосування методу безградієнтної оптимізації при синхронізації даних моніторингу робочого процесу двигунів внутрішнього згоряння / Р. А. Варбанець, Є. В. Белоусов, О. В. Єриганов, В. І. Кирнац, В. О. Маулевич, Н. І. Александровська // Авиационно-космическая техника и технология. Научно-технический журнал. Харьков, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ» – 2018. – №5(149). – С. 9–18. (*Наукометричні бази: eLIBRARY.RU, Index Copernicus, CiteFactor, AcademicKeys, Infobase Index, WordCat, Google Scholar*).

*Здобувач здійснював підготовку експерименту, брав участь в обробці даних моніторингу та формуванні висновків. Здійснював перевірку розроблених ним методів визначення основних параметрів робочого процесу судового дизеля в експлуатації і проводив аналіз даних Sea Trials.*

4. Ивановский В. Г. Исследование пусковых качеств и экономичности дизеля при установке гидрозатворных и механических форсунок / В. Г. Ивановский,



Р. А. Варбанец, В. П. Губанов, Е. И. Жолтиков, Ю. Н. Кучеренко, В. О. Маулевич // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. Астрахань. – 2018. – № 1. – С. 60–66. (*Наукометричні бази: Ulrich's Periodicals Directory, DOAJ (Швеція), Academic Search Research & Development, Applied Science & Technology Source, BSCO Publishing (США)*).

*Здобувач брав участь в обробці даних експериментальних досліджень і аналізі параметрів робочого процесу, обраних для діагностики технічного стану судових дизелів.*

5. Варбанец Р. А. Метод безградиентной минимизации Powell'64 в задачах мониторинга рабочего процесса судовых дизелей / Р. А. Варбанец, В. Г. Ивановский, А. В. Ерыганов, Ю. Н. Кучеренко, Е. И. Жолтиков, В. О. Маулевич // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. Астрахань. – 2017. – № 4. – С. 49–61. (*Наукометричні бази: Ulrich's Periodicals Directory, DOAJ (Швеція), Academic Search Research & Development, Applied Science & Technology Source, BSCO Publishing (США)*).

*Здобувачем здійснено підготовку даних для проведення процедури мінімізації і зроблений аналіз результатів нелінійної n-параметричної мінімізації.*

6. Варбанець Р. А. Застосування методу безградиентної оптимізації при синхронізації даних моніторингу робочого процесу судових двигунів / Р. А. Варбанець, Ю. М. Кучеренко, Є. І. Жолтіков, В. О. Маулевич, І. П. Кріжановська // Суднові енергетичні установки. Науково-технічний збірник. Одеса, Національний університет «Одеська морська академія». – 2019. – № 38. – С. 40–53.

*Здобувач брав участь у виборі і побудові функціоналів для мінімізації та аналізі результатів мінімізації.*

7. Варбанець Р. А. Застосування методу оптимізації в задачах робочого процесу судових двигунів / Р. А. Варбанець, Є. В. Белоусов, О. В. Єриганов, В. О. Маулевич, Н. І. Александровська, І. П. Кріжановська // Розвиток транспорту. Науковий журнал. Одеса, Одеський національний морський університет. – 2018. – № 2 (3). – С. 90–103.

*Здобувач брав участь у виборі і побудові функціоналів для мінімізації та аналізі результатів мінімізації. Здобувачем зроблено аналіз результатів нелінійної n-параметричної мінімізації в задачах розрахунку робочого процесу судових двигунів.*

#### **Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:**

8. Ю. Н. Кучеренко, Р. А. Варбанец, В. О. Маулевич. Определение эффективных показателей судовой дизельной энергетической установки // Матеріали ХХІІ міжнародного конгреса двигунобудівників, Національний аерокосмічний університет ім. Н.С. Жуковського «ХАІ» – Харків – Коблево, 4–9 вересня 2017 р.

9. Маулевич В. О. Моделирование рабочего процесса дизеля в среде AVL BOOST // Матеріали VIII міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні енергетичні установки на транспорті, технології та обладнання для їх обслуговування», Херсонська державна морська академія – Херсон, 28–29 вересня 2017 р. – С. 356.

10. В. О. Маулевич. Создание детализированной математической модели рабочего процесса дизеля в среде AVL BOOST // Матеріали VIII міжнародної науково-

технічної конференції «Суднова енергетика, стан і проблеми», НУК ім. адмірала Макарова. – Миколаїв, 8–10 листопада 2017 р. – С. 243–244.

11. Р. А. Варбанец, Е. В. Белоусов, А. В. Ерыганов, В. О. Маулевич, Н. И. Александровская. Методы вибродиагностики судовых дизелей с наддувом // Матеріали ХХІІІ міжнародного конгреса двигунобудівників, Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «ХАІ» – Харків – Коблево, 4–9 вересня 2018 р. – С. 57.

12. Varbanets R. A., Yeryganov O. V., Shumilo O. M., Loginov O.V., Kurnats V.I., Maulevych V.O. Marine diesel engines vibration diagnostics methods // Матеріали ІХ міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні енергетичні установки на транспорті, технології та обладнання для їх обслуговування», Херсонська державна морська академія. – Херсон, 13–14 вересня 2018 р. – С. 202.

13. S. Neumann, R. Varbanets, O. Kyrylash, V. Maulevych, O. Yeryganov. Marine diesel working cycle monitoring on the base of IMES pressure sensors data // Матеріали міжнародної науково-практичної конференції, присвяченій пам'яті професорів Фомина Ю. Я. і Семенова В. С. (FS - 2019). – Одеський національний морський університет – Одеса – Стамбул – Одеса (пором «Kaunas»), 24–28 квітня 2019 р. – С. 158–168.

14. S. Neumann, R. Varbanets, O. Kyrylash, V. Maulevych, O. Yeryganov. Marine diesel working cycle monitoring on the base of IMES pressure sensors data // Матеріали міжнародної науково-практичної конференції «Водний транспорт: Сучасний стан та перспективи розвитку», Державний університет інфраструктури та технологій, Київський інститут водного транспорту ім. гетьмана Петра Конашевича-Сагайдачного – Київ, 16–17 травня 2019 р. – С. 106–115.

15. Varbanets R., Kyrylash O., Maulevych V., Yeryganov O. Marine diesel working cycle monitoring on the base of IMES pressure sensors data // Матеріали ХІ міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT-2019)», Херсонська державна морська академія – Херсон, 28–30 травня 2019 р. – С. 394–399.

16. Р. А. Варбанец, В. О. Маулевич, Ю. Н. Кучеренко, В. И. Кырнац, Н. И. Александровская. Методы определения основных диагностических параметров рабочего процесса транспортных дизелей в эксплуатации // Матеріали ХХІV міжнародного конгреса двигунобудівників, Національний аерокосмічний університет ім. Н.Є. Жуковського «ХАІ» – Харків - Коблево, 2–7 вересня 2019 р.

17. Варбанець Р. А., Маулевич В. О., Кырнац В. І., Кучеренко Ю. М., Губін В. С. Визначення основних діагностичних параметрів робочого процесу транспортних дизелів в експлуатації // Матеріали Х міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні енергетичні установки на транспорті, технології та обладнання для їх обслуговування», Херсонська державна морська академія – Херсон, 12–13 вересня 2019 р. – С. 152.

18. В. О. Маулевич, Р. А. Варбанець, І. П. Крижановська. Визначення основних діагностичних параметрів робочого процесу транспортних дизелів в експлуатації / В. І. Кырнац, В.О. Маулевич, В. І. Холденко, Р. А. Варбанець, Р. О. Брусник. Моделювання робочого процесу двигуна 6S70MC-C8 по даним Sea Trials в середовищі AVL

Boost // Матеріали ІХ міжнародної науково-технічної конференції «Суднова енергетика, стан і проблеми», НУК ім. адмірала Макарова. – Миколаїв, 7–8 листопада 2019 р. – С. 135, 202–206.

## АНОТАЦІЯ

**Маулевич В. О. Визначення основних діагностичних параметрів робочого процесу транспортних дизелів в експлуатації.** – 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, 2020.

Дисертація присвячена актуальній проблемі розробки наукових методів визначення основних, найбільш значущих для діагностики технічного стану параметрів робочого процесу транспортних дизелів в експлуатації. Проведений аналіз показав, що існуючі методи потребують доопрацювання і вдосконалення.

Для визначення основних параметрів робочого процесу використовується тільки аналіз визначених під час експлуатації індикаторних діаграм і вібродіаграм паливної апаратури високого тиску.

Розроблено метод розрахунку фази початку згоряння в циліндрі транспортного дизеля шляхом уточнення розрахунку максимуму другої похідної індикаторної діаграми. Аналіз отриманих шляхом чисельного диференціювання першої і другої похідних діаграм тиску газів у робочому циліндрі став можливий після застосування фільтра *Butterworth* на базі дискретного перетворення Фур'є.

Розроблено метод визначення затримки самозаймання палива в робочому циліндрі, що використовує фазу початку згоряння в циліндрі і фазу переднього фронту вібродіаграми форсунки, визначену за максимумом її першої похідної. Використано різні діаграми – індикаторна і вібродіаграма. Фаза підйому голки визначена по максимуму першої похідної відповідного фронту вібродіаграми. Метод дає відносну похибку у визначенні затримки займання не більше 3%.

Удосконалено метод розрахунку частоти обертання колінчастого валу шляхом визначення періоду робочого циклу між центрами інтервалів фази закриття впускних клапанів і фази початку згоряння. Метод дозволяє з відносною похибкою менше 1% визначати частоту обертання на кожному циклі двигуна і здійснювати оцінку циклової нерівномірності обертання колінчастого валу.

Удосконалено розрахунок середнього індикаторного тиску шляхом визначення площ елементарних ділянок індикаторної діаграми для розрахунку середніх тисків на них. Метод розрахунку індикаторної потужності базується на використанні модифікованих розрахунків середнього індикаторного тиску і частоти обертання колінчастого валу. Сумарна відносна похибка визначення індикаторної потужності не перевищує 2,5%, що робить можливим подальший аналіз витрати палива дизелем, як засобом транспорту, і підвищує достовірність і якість діагностичних висновків.

Розроблені методи впроваджені в програмне забезпечення системи моніторингу морських дизелів DEPAS D4.0H, яка широко використовується в практиці експлуатації морських суден різного типу, в системі «Укрзалізниця» та на берегових дизельних

електростанціях. Вирішення цього актуального науково-практичного завдання підвищує якість експлуатації і ефективність ремонту транспортних дизелів.

**Ключові слова:** транспортні дизелі, основні параметри робочого процесу, діагностування, процес експлуатації, ремонт і технічне обслуговування.

## АННОТАЦІЯ

**Маулевич В. О. Определение основных диагностических параметров рабочего процесса транспортных дизелей в эксплуатации.** – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.22.20 – эксплуатация и ремонт средств транспорта. – Одесский национальный морской университет, Одесса, 2020.

Диссертация посвящена актуальной проблеме разработки научных методов определения основных, наиболее значимых для диагностики технического состояния параметров рабочего процесса транспортных дизелей в эксплуатации. Проведенный анализ показал, что существующие методы нуждаются в доработке и совершенствовании.

Для определения основных параметров рабочего процесса используется только анализ определяемых во время эксплуатации индикаторных диаграмм и вибродиаграмм топливной аппаратуры высокого давления.

Разработан метод расчета фазы начала сгорания в цилиндре транспортного дизеля путем уточнения расчета максимума второй производной индикаторной диаграммы. Анализ полученных путем численного дифференцирования первой и второй производных диаграмм давления газов в рабочем цилиндре стал возможен после применения фильтра *Butterworth* на базе дискретного преобразования Фурье.

Разработан метод определения задержки самовоспламенения топлива в рабочем цилиндре, использующий фазу начала сгорания в цилиндре и фазу переднего фронта вибродиаграммы форсунки, определенную по максимуму ее первой производной. Используются разнородные диаграммы – индикаторная и вибродиаграмма. Фаза подъема иглы определена по максимуму первой производной соответствующего фронта вибродиаграммы. Метод дает относительную погрешность в определении задержки воспламенения не более 3%.

Усовершенствован метод расчета частоты вращения коленчатого вала путем определения периода рабочего цикла между серединами интервалов фазы закрытия впускных клапанов и фазы начала сгорания. Метод позволяет с относительной погрешностью менее 1% определять частоту вращения на каждом цикле двигателя и производить оценку цикловой неравномерности вращения коленчатого вала.

Усовершенствован расчёт среднего индикаторного давления путем определения площадей элементарных участков индикаторной диаграммы для расчёта средних давлений на них. Метод расчета индикаторной мощности базируется на использовании модифицированных расчетов среднего индикаторного давления и частоты вращения коленчатого вала. Суммарная относительная погрешность определения индикаторной мощности не превышает 2,5%, что делает возможным дальнейший анализ расхода топлива дизелем, как средством транспорта, и повышает достоверность и качество диагностических выводов.

Разработанные методы внедрены в программное обеспечение системы мониторинга морских дизелей DEPAS D4.0H, которая широко используется в практике эксплуатации морских судов разного типа, в системе «Укрзалізниці» и на береговых дизельных электростанциях. Решение данной научно-практической задачи повышает качество эксплуатации и эффективность ремонта транспортных дизелей.

**Ключевые слова:** транспортные дизели, основные параметры рабочего процесса, диагностирование, процесс эксплуатации, ремонт и техническое обслуживание.

## ABSTRACT

**Maulevych V. O. Determination of the main diagnostic parameters of the working process of transport diesel engines in operation.** – The manuscript.

Scientific degree thesis for candidate of technical sciences, specialty 05.22.20 – operation and repair of vehicles. – Odessa National Maritime University, Odessa, 2020.

The thesis is devoted to the actual problem of developing scientific methods for determining the main, most significant for diagnosing the technical state of the parameters of the working process of transport diesel engines in operation. The analysis showed that the existing methods need to be refined and improved.

To determine the main parameters of the workflow, only analysis of indicator diagrams and vibration diagrams of high-pressure fuel equipment determined during operation is used.

A method has been developed for calculating the phase of the onset of combustion in the cylinder of a transport diesel engine by refining the calculation of the maximum of the second derivative of the indicator diagram. An analysis obtained by numerically differentiating the first and second derivatives of the gas pressure diagrams in the working cylinder became possible after applying the Butterworth filter based on the discrete Fourier transform.

A method has been developed for determining the delay of self-ignition of fuel in the working cylinder, using the phase of the onset of combustion in the cylinder and the phase of the leading edge of the nozzle vibrodiagram determined by the maximum of its first derivative. Heterogeneous diagrams were used – indicator and vibrodiagram. The needle lifting phase is determined by the maximum of the first derivative of the corresponding front of the vibrodiagram. The method gives a relative error in determining the ignition delay of not more than 3%.

The method for calculating the speed of the crankshaft by determining the period of the working cycle between the midpoints of the intervals of the closing phase of the intake valves and the phase of the start of combustion is improved. The method allows with a relative error of less than 1% to determine the frequency of rotation on each engine cycle and to evaluate the cyclic unevenness of rotation of the crankshaft.

The calculation of the average indicator pressure has been improved by determining the areas of elementary sections of the indicator diagram for calculating the average pressure on them. The indicator power calculation method is based on the use of modified calculations of the average indicator pressure and crankshaft speed. The total relative error in determining the indicator power does not exceed 2.5%, which makes it possible to further

analyze the fuel consumption of a diesel engine as a means of transport, and increases the reliability and quality of diagnostic conclusions.

The developed methods are implemented in the software for the monitoring of marine diesel engines DEPAS D4.0H, which is widely used in the practice of operating marine vessels of various types, in the «Ukrzaliznytsia» and in stationary diesel power plants. The solution of this scientific and practical problem improves the quality of operation and the efficiency of repair of transport diesel engines.

**Key words:** transport diesel engines, the main parameters of the working process, diagnosis, operation process, repair and maintenance.

Підп. до друку 22.10.2020. Формат 60x84/16. Папір офсет.  
Гарнітура Times New Roman. Ум. друк. арк. 1,16.  
Тираж 100 пр. Зам. № И20-10-61

Національний університет «Одеська морська академія»  
65029, м. Одеса, Дідріхсона, 8.  
Тел./факс (0482) 34-14-12  
publish-r@onma.edu.ua  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи  
ДК № 1292 від 20.03.2003