

Р. А. ВАРБАНЕЦЬ, Є. В. БЕЛОУСОВ, О. В. ЄРИГАНОВ, В. І. КИРНАЦ,
В. О. МАУЛЕВИЧ, Н. І. АЛЕКСАНДРОВСЬКА

Одеський національний морський університет, Україна

ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ БЕЗГРАДІЄНТНОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ ПРИ СИНХРОНІЗАЦІЇ ДАНИХ МОНІТОРИНГУ РОБОЧОГО ПРОЦЕСУ ДВИГУНІВ ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРЯННЯ

Розглянуто можливість застосування методу безградієнтної n -параметричної мінімізації Powell'64 в задачах моніторингу робочого процесу судових дизелів. Моніторинг робочого процесу судових дизелів зводиться до задачі циклічного аналізу індикаторних діаграм в робочих циліндрах. При цьому повинна бути вирішена задача синхронізації даних – переклад діаграм тиску з функції часу в функції від кута повороту колінчастого валу. Наведено, що апаратне визначення фаз повороту колінчастого валу за допомогою *pick-up sensors* налаштованих в статистиці матиме похибки під час роботи двигуна під навантаженням. Задача синхронізації повинна бути вирішеною за допомогою алгоритму шляхом аналізу індикаторної діаграми в реальному часі. Наведені приклади пошуку глобального мінімуму тестової функції Розенброка. За допомогою методу Powell'64 мінімізуються функціонали методу найменших квадратів в задачах синхронізації і моделювання кривих стиснення-розширення в робочому циліндрі. Показані випадки розрахунку синхронізації даних для малооберткових двотактних і середньооберткових чотиритактних судових дизелів. З урахуванням припущень, прийнятих на практиці, показано, що в точці максимальної швидкості росту тиску на кривій стиснення обсяг циліндра над поршнем може бути розрахований за допомогою відомих геометричних розмірів циліндра і значень P і $dP/d\phi$, отриманих з індикаторної діаграми. Наступним кроком є розрахунок першого наближення положення верхньої мертвої точки поршня, при чому необхідним є використання цифрових фільтрів. Остаточна задача синхронізації вирішується на базі рівняння $dP/d\phi = 0$, складеного для ділянки від початку стиснення до початку згоряння в циліндрі. Показаний вибір граничних умов моделювання. Перевагою використання методу Powell'64 є його висока ефективність для квадратичних функціоналів. На відміну від градієнтних методів, метод Powell'64 не вимагає розрахунку похідних і є універсальним для мінімізації складних нелінійних функціоналів загального вигляду. Оригінальний авторський алгоритм синхронізації даних шляхом аналізу індикаторних діаграм, в якому використовується метод Powell'64, застосований в останніх версіях систем моніторингу судових дизелів D4.0HT.

Ключові слова: безградієнтна мінімізація; функція Розенброка; робочий процес двигуна внутрішнього згоряння; політропа стиснення; функціонал.

Вступ і постановка проблеми

Моніторинг робочого процесу судових дизелів в кінцевому підсумку зводиться до задачі циклічного аналізу індикаторних діаграм в робочих циліндрах [1]. При цьому повинна бути вирішена задача синхронізації даних – переклад діаграм тиску з функції часу в функції від кута повороту колінчастого вала (ПКВ) [2, 3]. Для уявлення індикаторних діаграм у вигляді залежностей $P(V)$, $P(\phi)$ або $T(S)$ необхідно мати якомога більш точну відповідність між тисками в циліндрі і кутами ПКВ. Для цього використовуються датчики на маховику двигуна (*pick-up sensors* [4]), які вимірюють фазу ПКВ синхронно з датчиками тиску в циліндрі. Далі, із урахуванням геометрії циліндра і кривошипно-шатунного механі-

зму (КШМ) відбувається значення кута ПКВ перераховується в об'єм надпоршневого простору [3].

Проблема полягає в тому, що апаратне визначення фаз ПКВ за допомогою *pick-up sensors*, налаштованих в статистиці, матиме похибки під час роботи двигуна під навантаженням. Основні джерела цієї похибки наступні:

- вибірка мікролюфтів КШМ при знакозмінному навантаженні;
- крутильні коливання і скручування колінчастого вала;
- хвильові ефекти і затримка сигналу тиску при проходженні ним шляху від умовного центру камери згоряння до мембрани датчика в разі вимірювання тиску через канал індикаторного крана.

Остання складова може бути дуже істотною (до 8° ПКВ у середньооборотних дизелів (СОД) і до 12°

ПКВ у високооборотних дизелів) [5]. А в зв'язку з тим, що всі переносні системи моніторингу використовують саме цей спосіб вимірювання тиску і це є звичайною практикою індіціювання судових дизелів, можна сміливо припустити, що використання *pick-up sensors* для переносних систем взагалі недоцільно. Проблему пропонується вирішити за допомогою аналітичного методу синхронізації, що включає розрахунок верхньої мертвої точки (ВМТ) і базується на застосуванні параметричної оптимізації.

Стан проблеми

Аналіз останніх досліджень і публікацій показує в першу чергу, що завдання визначення положення ВМТ є важливою складовою моніторингу робочого процесу, оскільки від точності його рішення істотно залежить розрахункове значення середнього індикаторного тиску і індикаторної потужності циліндра. У загальному вигляді залежність похибки розрахунку індикаторної потужності від похибки ВМТ показана в роботі М. Tazerout – на кожен градус похибки доводиться до 9% розрахункового значення потужності [6].

Термодинамічні методи розрахунку і коригування положення ВМТ запропоновано в роботах [5, 6]. Вони засновані, зокрема, на розрахунку ентропії при відомих значеннях тиску в циліндрі. Коментуючи їх, можна відзначити, що наявність цифрових і аналогових шумів при вимірюванні тиску в циліндрі може значно знизити точність складних розрахунків. Чисельне визначення першої, а тим більше другої похідної не має сенсу без спеціальної обробки вихідних даних (наприклад, за допомогою *LowPass FFT Filter* [7]).

Цікава властивість індикаторної діаграми, точніше її першої похідної, визначена в роботі [8]. З урахуванням припущень, прийнятих на практиці, показано, що в точці максимальної швидкості росту тиску на ділянці стиснення обсяг циліндра дорівнює

$$V = \frac{P(V)^2}{PV'' + P'V'},$$

$$\text{де } \frac{dP}{d\varphi} = P'; \quad \frac{d^2P}{d\varphi^2} = P''; \quad \frac{dV}{d\varphi} = V'; \quad \frac{d^2V}{d\varphi^2} = V''.$$

Таким чином, обсяг циліндра над поршнем у зазначеній точці може бути розрахований за допомогою відомих геометричних розмірів циліндра і значень $P(\varphi)$ і $P'(\varphi)$, отриманих з індикаторної діаграми. Далі може бути визначений обсяг камери стиснення і положення ВМТ, як запропоновано

в [9, 10]. Цей теоретично коректний висновок даного положення, на жаль, також складно використовувати на практиці, тому що точність розрахунку обсягу камери стиснення і положення ВМТ сильно залежать від шумів записаної діаграми тиску. Застосування *LowPass* фільтра [7] необхідно обґрунтувати для кожного конкретного випадку, з огляду на параметри аналого-цифрового перетворення, дискретність і аналогові шуми при вимірюванні тиску в робочих циліндрах за допомогою датчиків різних фірм.

Метою даної публікації є аналіз рішення задачі визначення ВМТ за допомогою моделювання кривої швидкості стиснення. При аналізі використовується частина даних індикаторної діаграми до початку згоряння, за якими визначаються коефіцієнти моделі $P'(\varphi)$. При цьому мінімізуються функціонали, складені відповідно до вимог методу найменших квадратів (МНК):

$$F = \sum_{i=1}^{l_2} \sigma_i [P'(\varphi_i) - P'_i]^2 \rightarrow \min;$$

$$\bar{F} = \sum_{i=1}^{l_2} \sigma_i [P'(\varphi_i) / P'_i - 1]^2 \rightarrow \min,$$

де l_1, l_2 – границі моделювання, які визначаються від початку стиснення до початку згоряння; P'_i – значення перших похідних, отримані за допомогою методів чисельного диференціювання індикаторної діаграми; σ_i – вагові функції.

Мінімізацію зазначеного функціоналу пропонується провести за допомогою методу безградієнтної мінімізації *Powell'64* [11, 12]. Цей метод дозволяє визначити мінімум нелінійної функції n -змінних шляхом успішних пошуків уздовж системи сполучених напрямків [11]. Метод *Powell'64* не використовує похідних для здійснення пошуку, що вельми зручно в практичних розрахунках. Крім того, він є ефективним не тільки для квадратичних функцій, але і для нелінійних n -параметричних функцій загального вигляду.

Приклад використання методу Powell'64 на тестовій функції

Покажемо спочатку роботу нелінійного методу n -параметричної безградієнтної мінімізації по зв'язаних напрямках *Powell'64* на прикладі тестової функції Розенброка [11]

$$Z(x_1, x_2) = 100(x_1 - x_2^2)^2 + (1 - x_1)^2.$$

Відома нелінійна двопараметрична функція Розенброка часто використовується для тестування

методів мінімізації в зв'язку з її специфічною формою. Її легко уявити візуально (рис. 1) – вона являє собою вигнутий яр з крутими схилами і довгим слабо мінливим криволінійним дном. Її мінімум ($Z = 0$) знаходиться в точці $[x_1 = 1, x_2 = 1]$.

Специфіка пошуку мінімуму функції Розенброка полягає в тому, що якщо задати початкову точку пошуку $[x_1 = -2, x_2 = 2]$ ($Z = 3609$), яка відносно точки мінімуму знаходиться з іншого боку криволінійного яру, то метод мінімізації повинен обійти усе криволінійне дно функції і вийти на точку глобального мінімуму. Від того, наскільки швидко буде знайдений мінімум функції Розенброка з незручної початкової точки пошуку $[x_1 = -2, x_2 = 2]$, залежить ефективність того чи іншого методу мінімізації. Враховується загальна кількість ітерацій методу і кількість розрахунків самої функції Розенброка.

Використання пов'язаних [11, 12] напрямків пошуку є ефективним алгоритмом для квадратичних n -параметричних функцій і, відповідно, для вирішення завдань МНК. У спеціальній літературі з аналізу методів мінімізації [11] зазначено, що ряд градієнтних методів, зокрема метод найшвидшого спуску, виявляється неефективним для деяких квадратичних функцій. Наприклад, в даному випадку, при початковій точці пошуку $[x_1 = -2, x_2 = 2]$, градієнтні методи можуть виробляти велику кількість обчислень функції Розенброка, визначаючи локальні мінімуми між бічними схилами яру і при цьо-

му повільно рухаючись в сторону глобального мінімуму. Застосований в методі Powell'64 алгоритм пошуку по зв'язаним напрямкам позбавлений цього недоліку. З кожного локального мінімуму на наступній ітерації, при необхідності, відбувається поворот осей в сполучених напрямках [12], і рух в бік глобального мінімуму відбувається великими кроками по дну яру функції (рис. 2). Покроковий алгоритм методу Powell'64 описаний в [11].

У даній публікації використовується модифікація методу Powell'64, яка передбачає використання методу «золотого перетину» (GM) [11] при пошуку локальних мінімумів в напрямку осей. В оригінальному методі використовується пошук мінімуму в осьових напрямках за допомогою квадратичної функції [12]. Виявилось, що ефективність методу «золотого перетину» вище, ніж у методу послідовного розподілу навпіл, і істотно перевершує ефективність пошуку непослідовними методами [11]. Пошук GM заснований на розбитті відрізка прямої на дві частини, ϕ^1 і ϕ^2 , при цьому відношення довжини всього відрізка до більшої частини дорівнює відношенню більшої частини до меншої. Відрізки пропорційні числам Фібоначчі:

$$\phi^1 = \frac{\sqrt{5}-1}{2} \approx 0,62; \quad \phi^2 = \frac{3-\sqrt{5}}{2} \approx 0,38;$$

$$\phi^1 + \phi^2 = 1.$$

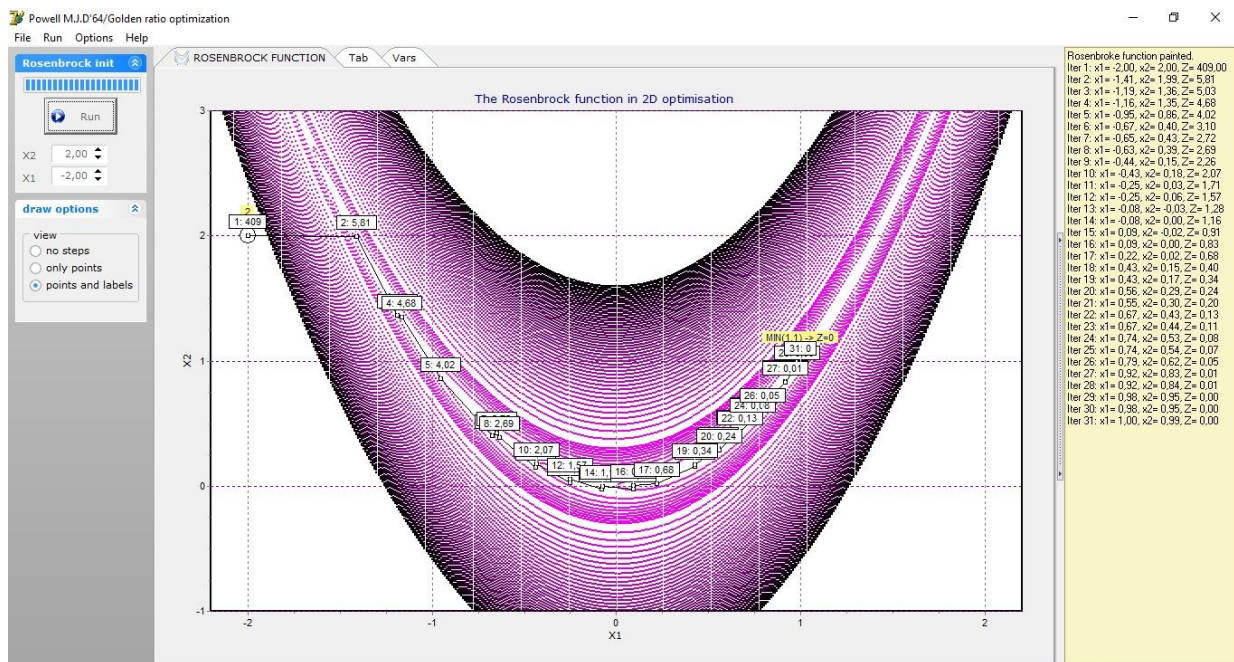


Рис. 1. Пошук мінімуму функції Розенброка [11] за допомогою методу Powell'64 (копія екрану інтерфейсу тестового ПО)

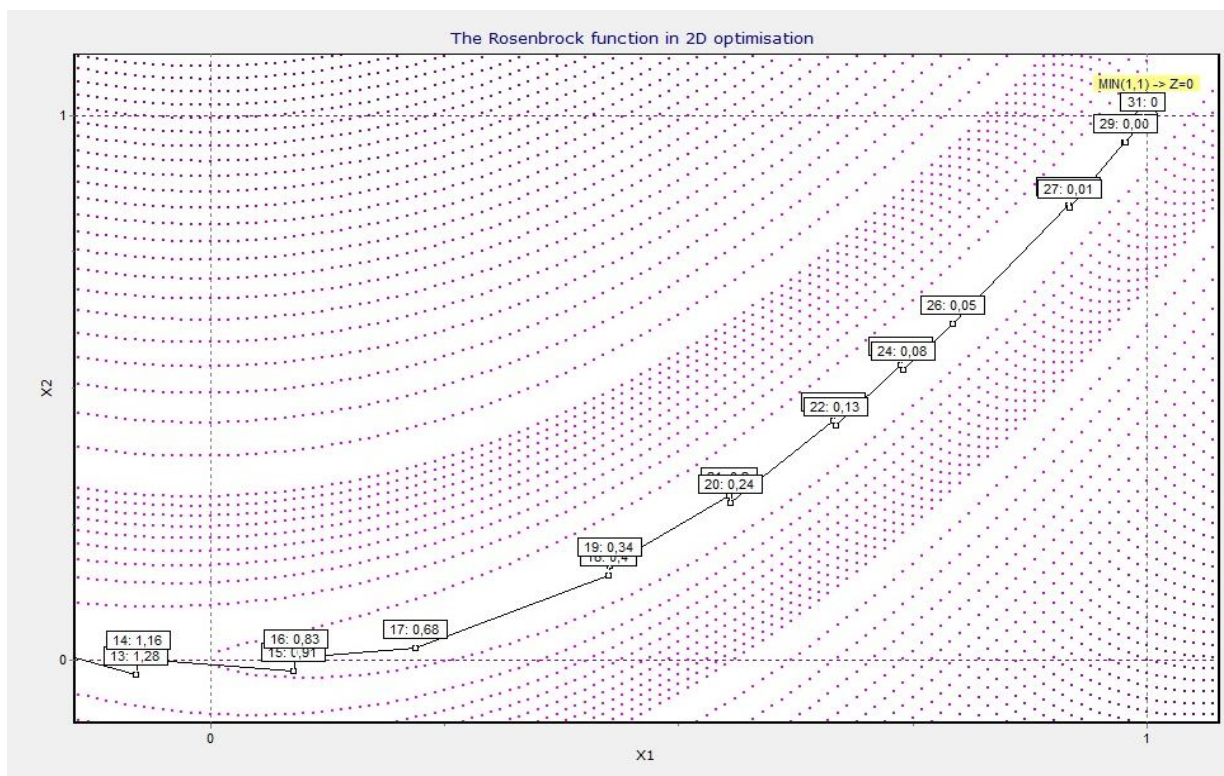


Рис. 2. Етапи пошуку функції Розенброка [11] в районі точка мінімуму (копія екрану інтерфейсу тестового ПО)

На думку авторів, використання методу «золотого перетину» більш ефективно для нелінійних функцій загального вигляду, для яких розрахунок за допомогою оригінального алгоритму [12] часто призводить до переповнення регістрів пам'яті комп'ютера, що вимагає необхідного спеціального контролю.

В даному випадку кількість загальних ітерацій при пошуку мінімуму функції Розенброка з поворотом осей в сполучених напрямках склало 31. На рис. 2 видно, що метод Powell'64 вже на другий ітерації швидко визначає положення дна яру функції і потім здійснює великі ефективні кроки в бік глобального мінімуму по дну яру (рис. 3). Порівняльний аналіз методів n-параметричної нелінійної мінімізації, наведений в [11], показує, що метод Powell'64 є найбільш ефективним методом пошуку мінімумів n-параметричних нелінійних функцій загального вигляду без використання похідних.

У загальному випадку градієнтні методи дають велику швидкість пошуку, але необхідність завдання приватних похідних за параметрами пошуку ускладнює оптимізаційних задач і може служити причиною складно виявлюваних помилок.

Найчастіше функціонал, що мінімізується, являє собою складну нелінійну функцію загального вигляду або є результатом роботи алгоритму зі складною умовно змінюваною структурою. В цьому випадку для пошуку мінімуму такого функціо-

налу задаються граничні умови по незалежних змінних, в рамках яких повинен бути знайдений мінімум. Використання перших, а тим більше других похідних по незалежних змінних часто виявляється незручним для дослідників, тому що в більшості випадків вони модифікують свій алгоритм, використовуючи чисельне наближення похідних; це ускладнює процес досліджень і є джерелом складно виявлюваних помилок. Використання ж алгоритму Powell'64 не пов'язане з похідними і має ефективність, яка не поступається градієнтним методам [11, 12].

Визначення ВМТ

ВМТ визначається за допомогою рівняння $P'(\varphi) = 0$. Використовується той факт, що при відсутності згоряння в циліндрі швидкість зміни тиску в ВМТ дорівнює нулю [5], за вирахуванням термодинамічного зміщення, пов'язаного з передачею тепла в стінки циліндра (див. рис. 3) [3, 10]:

$$\frac{dP}{d\varphi_{\text{ВМТ}}} = 0; \quad p'_{\varphi - \delta\varphi_T} = p'_{\Theta} = 0.$$

З урахуванням термодинамічної фазового зсуву в ВМТ ($\varphi = 0$)

$$\Theta = -\delta\varphi_T.$$

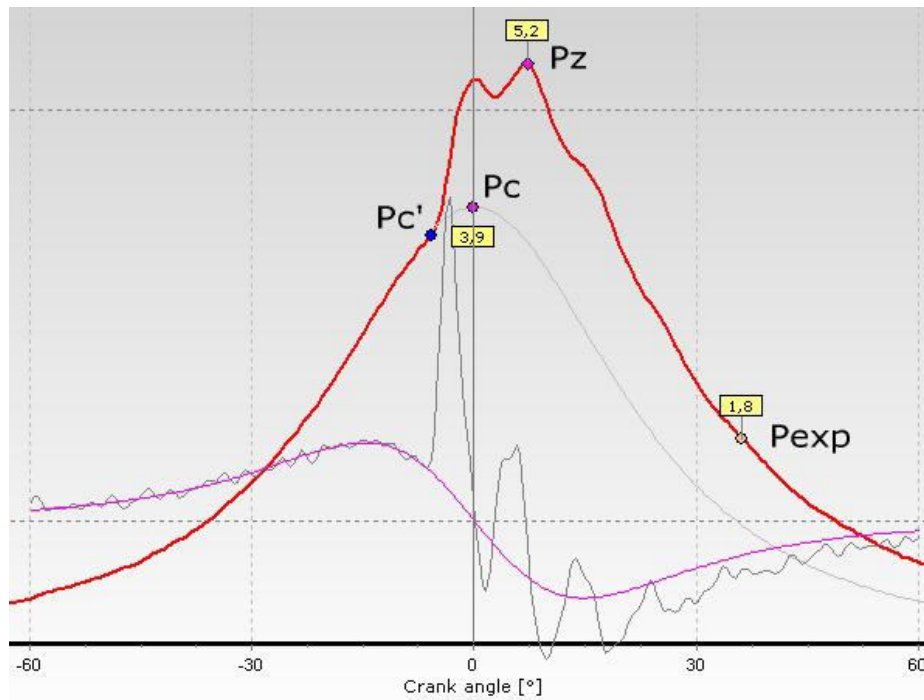


Рис. 3. Моделивання $dP/d\varphi$ на ділянці стиснення: P_c' – тиск початку згоряння; P_c – тиск в кінці стиснення; P_z – максимальний тиск згоряння палива; P_{exp} – тиск в точці 36° за ВМТ

Тоді вираз для швидкості зміни тиску на ділянці стиснення можна записати як

$$\frac{dP_{comp}}{d\Theta} = -P_a V_a^{n_1} n_1 \frac{1}{V_{\Theta}^{n_1+1}} \cdot \frac{dV_{\Theta}}{d\Theta}, \quad (1)$$

де P_a – тиск на початку стиснення;

$V_{\Theta} = V_{\varphi - \delta\varphi_T}$ – об'єм циліндра;

$$V_{\varphi} = V_c + 0,5V_s \left[1 + \frac{1}{\lambda_{ш}} - \cos \varphi - \frac{1}{\lambda_{ш}} \sqrt{1 - (\lambda_{ш} \sin \varphi)^2} \right];$$

$V_s = V_c (\varepsilon - 1)$ – об'єм, описуваний повним ходом поршня;

V_c – об'єм камери стиснення;

$\lambda_{ш} = R_{кр} / L_{ш} = S / 2L_{ш}$ – відношення радіуса кривошипа до довжини шатуна;

V_a – об'єм циліндра на початку стиснення;

n_1 – показник політропи стиснення.

Після нескладних перетворень права частина рівняння (1) перетворюється в нелінійне трансцендентне рівняння щодо кута ПКВ:

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

Дійсний корінь рівняння (2) визначається за допомогою чисельного методу (наприклад, BISECT [11]) в діапазоні між абсцисами максимумів $P'(\varphi)$ на ділянках стискування і згоряння ($[P'_{max1}, P'_{max2}]$, рис. 4). Цей корінь являє собою розрахункове значення ВМТ.

У процесі розрахунку алгоритм Powell'64 використовується двічі: спочатку для попередньої оцінки положення ВМТ за допомогою синусоїдальної моделі, потім остаточний розрахунок шляхом моделювання швидкості зміни тиску. Метод Powell'64 використовується для мінімізації функціоналу, записаного відповідно до вимог МНК:

$$F = \sum_{j=1}^m \left(P'_j - \frac{dP_{comp}}{d\varphi_j} \right)^2 \mapsto \min,$$

де m – кількість точок на ділянці до P_c' .

На рис. 5 представлений графік швидкості зміни тиску, отриманий за допомогою методів чисельного диференціювання кривої $P(\varphi)$.

На графіку другої похідної (див. рис. 5) показані контрольні точки, що визначають положення ВМТ (точка m), а також граничні точки для побудови лінійної і синусної моделей. В окремих випадках пошук коефіцієнтів моделі (1) зручніше проводити шляхом пошуку мінімуму другої похідної $P''(\varphi)$.

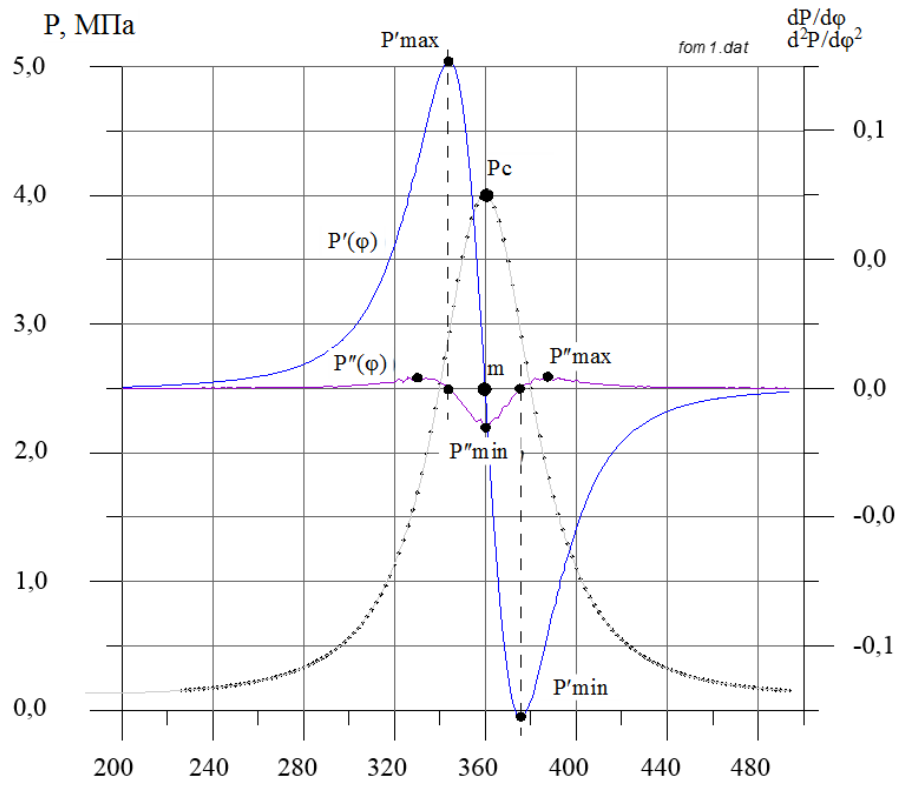


Рис. 4. Графіки $P(\varphi)$, $P'(\varphi)$, $P''(\varphi)$ стиснення-розширення СОД ЧН25/34

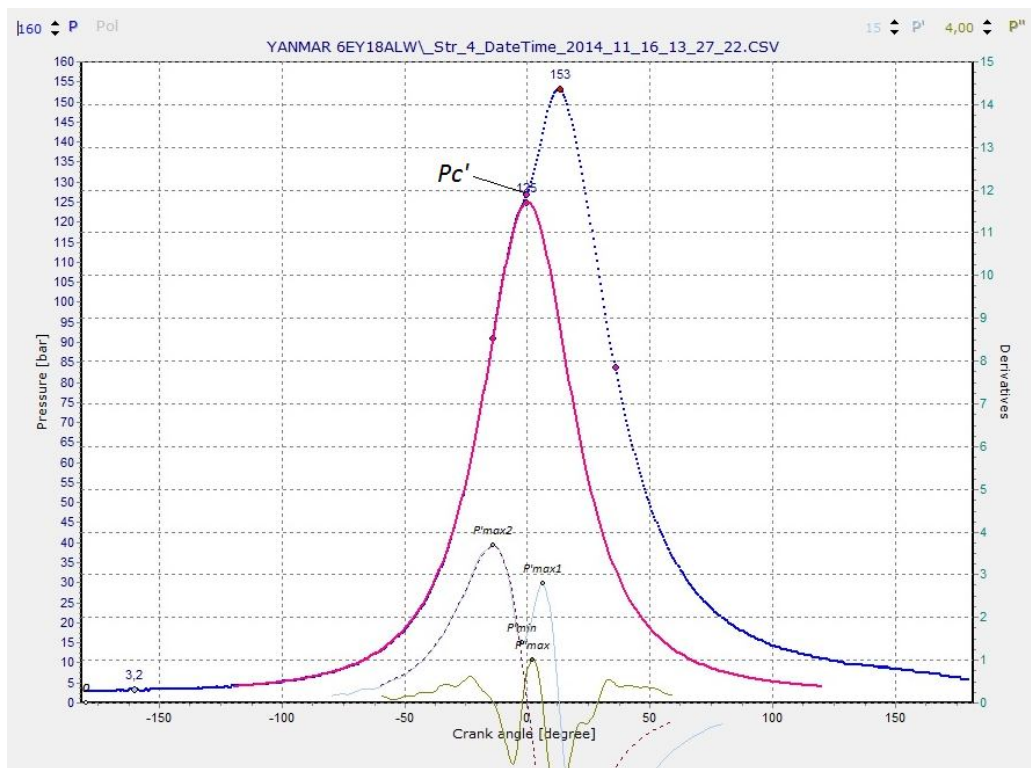


Рис. 5. Індикаторна діаграма $P(\varphi)$ і моделі P' , P'' середньооборотного дизеля Yanmar 6EY18ALW (копія екрану тестового ПО)

Для випадку аналізу довільного ряду значень тиску, де представлені кілька поспіль записаних в пам'ять робочих циклів, попередню оцінку значень ВМТ (точка m) кожного циклу зручніше проводити

пошуком локальних мінімумів $\frac{d^2P}{d\varphi^2} \rightarrow \min$

(див. рис. 4).

Крім того, при розрахунку попередньої синхронізації, в синусоїдальній і лінійній моделях використовуються координати точок B і C , де $B = P'_{\max}$, а $C = P'_{\max}$.

Ці координати розраховуються як позитивні корені нелінійного рівняння $\frac{d^2P}{d\varphi^2} = 0$, де область визначення коренів

$$\varphi \in [2\pi - \Delta\varphi, 2\pi + \Delta\varphi], \text{ де } \Delta\varphi \leq 20^\circ \text{ ПКВ.}$$

Для визначення лівої границі в попередній синхронізації за синусоїдальною моделлю використовується ліва координата максимуму другої похідної. У цьому випадку проводиться пошук локального

максимуму $\frac{d^2P}{d\varphi^2} \rightarrow \min$ в області визначення значень кутів φ :

$$\varphi \in [2\pi - \Delta\varphi, 2\pi], \text{ де } \Delta\varphi \leq 30^\circ \text{ ПКВ.}$$

В кінцевому підсумку уточнювалися чисельні значення коефіцієнтів $dP_{\text{сomp}}/d\varphi$, розраховані за зареєстрованими точками ділянки кривої швидкості зміни тиску до початку згоряння, і уточнювалося справжнє значення ВМТ як кут, при якому швидкість зміни тиску дорівнює нулю.

Приклад рішення задачі визначення ВМТ за допомогою методу Powell'64

Визначення положення ВМТ за допомогою моделювання кривої швидкості стиснення $P'(\varphi)$ і подальшого розв'язання рівняння $P'(\varphi) = 0$ є, на думку авторів, найбільш ефективним на практиці методом.

Для вирішення завдання використовується той факт, що при відсутності згоряння в циліндрі швидкість зміни тиску в ВМТ дорівнює нулю. Цифрові і аналогові шуми в вихідних даних ускладнюють моделювання ділянки стиснення на індикаторній діаграмі, але це завдання вирішується за допомогою, наприклад, Butterworth LowPass FFT Filter [7].

На рис. 5. представлено вирішення завдання визначення ВМТ вищевказаним алгоритмом для суднового середньооборотного дизеля Yanmar

6EY18ALW. Початок згоряння палива в даному випадку – до ВМТ, і цей випадок складніший для розрахунку, ніж випадок з розрахунком малооборотних дизелів з пізнім уприскуванням палива. Інтервал моделювання кривої стиснення: від початку стиснення (закриття клапанів МГР) до початку вприскування палива в циліндр. Фазу початку згоряння P'_c було б зручно розглядати в якості правої межі, тому що для цього достатньо наявності лише самої діаграми $P(\varphi)$ [13]. Однак якщо розглядати праву межу як фазу початку згоряння, то в ділянці моделювання потрапляє частина даних після уприскування палива, які вже не уявляють собою політропи стиснення внаслідок випаровування палива, відбору на це частини енергії і часткового зниження тиску в циліндрі [14].

При використанні методів вібродіагностики паливної апаратури високого тиску можна визначити фазу початку вприскування палива в циліндр [5]. У всіх інших випадках необхідно враховувати затримку самозаймання палива і зрушувати на неї праву межу моделювання кривої стиснення щодо точки початку згоряння (P'_c , див. рис. 5).

Висновки

Алгоритм програмної синхронізації даних робочого процесу був розроблений і вперше застосований в переносних системах DEPAS 2.34 [5]. Остання модифікація алгоритму застосовується в системах DEPAS D4.0HT і отримала назву PLS-алгоритм (PhaseLess Synchronization algorithm).

У всіх випадках, де проводився пошук локальних мінімумів і максимумів нелінійних функцій від двох і більше змінних, використовувався метод мінімізації за зв'язаними напрямками, що не використовує похідні – метод Powell'64. Цей метод виявився стійким навіть для випадку 7% «зашумлення» даних білим шумом (рівень шумів для даних, отриманих системою D4.0H «корисний сигнал / шум» оцінюється величиною 3%) [5, 13]. Незважаючи на те, що, по суті, Powell'64 – це метод пошуку з умовним закінченням ітерацій, вдалося сформулювати такі початкові умови, при яких загальний час виконання завдання синхронізації виявився прийнятно малим (одиниці мілісекунд) для більшості сучасних контролерів.

Накопичений досвід роботи в області моніторингу робочого процесу суднових дизелів дозволяє стверджувати, що використання PLS-алгоритму при практичному індіціюванні СДВС є більш переважним з таких міркувань:

1) автоматичне обчислення похибок визначення ВМТ (установка фазового датчика і маркування маховика виконується на зупиненому двигуні. Під

час роботи дизеля ВМТ зміщується через скручування колінчастого вала, пропорційно навантажено збільшується на далеких від маховика циліндрах через крутильні коливання; зазори в КШМ та інших фактори, які неможливо врахувати в «статистиці»):

- PLS-алгоритм автоматично враховує вплив скручування колінчастого вала на навантаженому двигуні;

- PLS-алгоритм автоматично враховує вплив невідповідності між справжнім станом ВМТ і маркування на маховику, що виникає внаслідок можливості неточного маркування маховика, впливу зазорів в деталях КШМ і інших експлуатаційних факторів;

- PLS-алгоритм автоматично враховує вплив кінцевої швидкості проходження хвилі тиску в каналі індикаторного крана (від камери згоряння до мембрани датчика тиску);

2) можливість здійснювати індіціювання без попередньої підготовки двигуна (під час роботи з системами моніторингу робочого процесу, що використовують апаратну синхронізацію, найбільш трудомісткою і тривалою частиною налаштування системи є установка фазового датчика і маркування маховика):

- в разі застосування PLS-алгоритму відсутні часові та фінансові витрати на установку фазових датчиків;

- застосування PLS-алгоритму дозволяє здійснювати індіціювання дизеля безпосередньо в процесі його експлуатації без примусової зміни режиму його роботи і без спеціальної підготовки, яка необхідна при апаратній синхронізації даних;

- PLS-алгоритм дозволяє створити універсальну переносну малогабаритну систему діагностичного контролю робочого процесу транспортних дизелів [1, 5, 13].

Література

1. Varbanets, R. Analyse of marine diesel engine performance [Text] / R. Varbanets, A. Karianskiy // *Journal of Polish CIMAC. Energetic Aspects*. – 2012. – Vol. 7, No. 1. – P. 269–275.
2. Staś, M. An Universally Applicable Thermodynamic Method for T.D.C. Determination [Electronic resource] / M. Staś // *SAE Technical Papers*. – 2000. – 7 p. – Access mode: <http://papers.sae.org/2000-01-0561>. – 15.09.2018. doi: 10.4271/2000-01-0561.
3. Heywood, J. B. *Internal Combustion Engine Fundamentals* [Text] / J. B. Heywood. – First Edition. – McGraw-Hill Education, 1988. – 930 p.
4. CCM – COMBUSTION MONITORING SYSTEM [Electronic resource]. – Access mode: <http://www.imes.de/cms.html>. – 16.09.2018.
5. Варбанец, Р. А. *Диагностический контроль*

рабочего процесса судовых дизелей в эксплуатации [Текст] : дисс. ... д-ра техн. наук : 05.05.03 : защита 06.05.2010 : утв. 17.12.2010 / Варбанец Роман Анатольевич. – Одесса, 2010. – 314 с.

6. Tazerout, M. TDC Determination in IC Engines Based on the Thermodynamic Analysis of the Temperature-Entropy Diagram [Electronic resource] / M. Tazerout, O. Le Corre, S. Rousseau // *SAE Technical Papers*. – 1999. – 12 p. – Access mode: <http://papers.sae.org/1999-01-1489/>. – 16.09.2018. doi: 10.4271/1999-01-1489.

7. Butterworth filter [Electronic resource]. – Access mode: https://en.wikipedia.org/wiki/Butterworth_filter. – 15.09.2018.

8. Ерыганов, А. В. *Определение степени сжатия дизеля по результатам индицирования рабочего процесса* [Текст] / А. В. Ерыганов, Р. А. Варбанец // *Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технологии*. – 2017. – № 1. – С. 44–49.

9. Семенов, В. С. *Современные проблемы теории судовых дизелей* [Текст] / В. С. Семенов. – М. : В/О Мортехинформреклама, 1991. – 112 с.

10. Ваншейдт, В. А. *Судовые двигатели внутреннего сгорания* [Текст] / В. А. Ваншейдт. – Л. : Судостроение, 1977. – 392 с.

11. Химмельблау, Д. *Прикладное нелинейное программирование* [Текст] / Д. Химмельблау. – М. : Мир, 1975. – 525 с.

12. Powell, M. J. D. An efficient method for finding the minimum of a function of several variables without calculating derivatives [Text] / M. J. D. Powell // *The Computer Journal*. – 1964. – Vol. 7, Issue 2. – P. 155–162.

13. Варбанец, Р. А. *Мониторинг частотных параметров судового дизеля с турбонаддувом* [Текст] / Р. А. Варбанец, А. И. Головань, Ю. Н. Кучеренко // *Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технологии*. – 2013. – № 1. – С. 103–110.

14. Белоусов, Е. В. *Топливные системы современных судовых дизелей* [Текст] : учеб. пособие / Е. В. Белоусов. – Херсон : ХГМА, 2014. – 267 с.

References

1. Varbanets, R., Karianskiy, A. Analyse of marine diesel engine performance. *Journal of Polish CIMAC. Energetic Aspects*, 2012, vol. 7, no. 1, pp. 269-275.
2. Staś, M. An Universally Applicable Thermodynamic Method for T.D.C. Determination. *SAE Technical Papers*, 2000, 7 p. Available at: <http://papers.sae.org/2000-01-0561> (accessed 15 September 2018). doi: 10.4271/2000-01-0561.
3. Heywood, J. B. *Internal Combustion Engine Fundamentals*. “McGraw-Hill Education” Publ., 1988. 930 p.
4. CCM – Combustion Monitoring System. Available at: <http://www.imes.de/cms.html> (accessed 16 September 2018).

5. Varbanets, R. A. *Diagnostichestskii kontrol' rabocheho protsessa sudovykh dizelei v ekspluatatsii*. Diss. dokt. techn. nauk [Diagnostic monitoring of marine diesel engine working process during operation. Dr. techn. sci. diss.]. Odessa, 2010. 314 p.

6. Tazerout, M., Le Corre, O., Rousseau, S. TDC Determination in IC Engines Based on the Thermodynamic Analysis of the Temperature-Entropy Diagram. *SAE Technical Papers*, 1999, 12 p. Available at: <http://papers.sae.org/1999-01-1489/> (accessed 16 September 2018). doi: 10.4271/1999-01-1489.

7. *Butterworth filter*. Available at: https://en.wikipedia.org/wiki/Butterworth_filter (accessed 15 September 2018).

8. Eryganov, A. V., Varbanets, R. A. Opredelenie stepeni szhatija dizelja po rezul'tatam indicirovaniya rabocheho processa [Determination of compression ratio by results of diesel monitoring data]. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Morskaya tekhnika i tekhnologii*, 2017, no. 1, pp. 44-49.

9. Semenov, V. S. *Sovremennye problemy teorii sudovykh dizelei* [Modern problems of theory of ships

diesel engines]. Moscow, "Mortekhinformreklama" Publ., 1991. 112 p.

10. Vansheidt, V. A. *Sudovye dvigateli vnutrennego sgoraniya* [Ships internal combustion engines]. Leningrad, "Sudostroenie" Publ., 1977. 392 p.

11. Himmelblau, D. *Prikladnoe nelineinoe programmirovaniye* [Applied nonlinear programming]. Moscow, "Mir" Publ., 1975, 525 p.

12. Powell, M. J. D. An efficient method for finding the minimum of a function of several variables without calculating derivatives. *The Computer Journal*, 1964, no. 7, pp. 155-162.

13. Varbanets, R. A., Golovan A. I., Kucherenko Y. N. Monitoring chastotnykh parametrov sudovogo dizelja s turbonadduvom [Monitoring of frequency parameters of turbocharged ships diesel]. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Morskaya tekhnika i tekhnologii*, 2013, no. 1, pp. 103-110.

14. Belousov, E. V. *Toplivnyye sistemy sovremennykh sudovykh dizelei: ucheb. posobie* [Fuel systems of modern ships diesels: teaching aid]. Kherson, KhGMA Publ., 2014. 267 p.

Поступила в редакцию 17.09.2018, рассмотрена на редколлегии 3.10.2018

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА БЕЗГРАДИЕНТНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ПРИ СИНХРОНИЗАЦИИ ДАННЫХ МОНИТОРИНГА РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

*Р. А. Варбанец, Е. В. Белоусов, А. В. Ерыганов, В. И. Кырнац,
В. О. Маулевич, Н. И. Александровская*

Рассмотрена возможность применения метода безградиентной n -параметрической минимизации Powell'64 в задачах мониторинга рабочего процесса судовых дизелей. Мониторинг рабочего процесса судовых дизелей сводится к задаче циклического анализа индикаторных диаграмм в рабочих цилиндрах. При этом должна быть решена задача синхронизации данных - перевод диаграмм давления из функций времени в функции от угла поворота коленчатого вала. Показано, что аппаратное определение фаз поворота коленчатого вала с помощью pick-up sensors настроенных в статике будет иметь погрешности при работе двигателя под нагрузкой. Задача синхронизации должна быть решена с помощью алгоритма путём анализа индикаторной диаграммы в реальном времени. Приведены примеры поиска глобального минимума тестовой функции Розенброка. С помощью метода Powell'64 минимизируются функционалы метода наименьших квадратов в задачах синхронизации и моделирования кривых сжатия-расширения в рабочем цилиндре. Показаны случаи расчёта синхронизации данных для малооборотных двухтактных и средневращающихся четырёхтактных судовых дизелей. С учётом предположений, принятых на практике, показано, что в точке максимальной скорости роста давления на кривой сжатия объём цилиндра над поршнем может быть рассчитан с помощью известных геометрических размеров цилиндра и значений P и $dP/d\varphi$, полученных с индикаторной диаграммы. Следующим шагом является расчёт первого приближения положения верхней мёртвой точки поршня, причём необходимо использование цифровых фильтров. Окончательно задача синхронизации решается на базе уравнения $dP/d\varphi = 0$, составленного для участка от начала сжатия до начала сгорания в цилиндре. Показан выбор граничных условий моделирования. Преимуществом использования метода Powell'64 является его высокая эффективность для квадратичных функционалов. В отличие от градиентных методов, метод Powell'64 не требует расчёта производных и является универсальным для минимизации сложных нелинейных функционалов общего вида. Оригинальный авторский алгоритм синхронизации данных путём анализа индикаторных диаграмм, в котором используется метод Powell'64, применён в последних версиях систем мониторинга судовых дизелей D4.0HT.

Ключевые слова: безградиентная минимизация Функция Розенброка; рабочий процесс двигателя внутреннего сгорания; политропа сжатия; функционал.

**APPLICATION OF THE GRADIENTLESS OPTIMIZATION METHOD
IN THE SYNCHRONIZATION OF THE MONITORING DATA OF THE WORKING PROCESS
OF THE INTERNAL COMBUSTION ENGINES**

*R. A. Varbanets, E. V. Belousov, A. V. Yeryganov, V. I. Kyrnats,
V. O. Maulevych, N. I. Aleksandrovskaya*

The possibility of using the gradientless n-parametric minimization of Powell'64 in the tasks of monitoring the workflow of ship diesel engines is considered. Monitoring the workflow of ship diesel engines includes the problem of cyclical analysis of indicator diagrams in the working cylinders. The problem of data synchronization should be solved - the transfer of pressure charts from the time function to an angle of crankshaft rotation function. It is shown that the hardware detection of the crankshaft rotation phases applying pick-up sensors configured in statics will have errors when the engine is under load. The synchronization task should be solved with the help of an algorithm by analyzing the indicator diagram in real time. Examples of the search for a global minimum of the Rosenbrock test function are given. Applying the Powell'64 method, least square method functionals are minimized in problems of synchronization and modeling of compression-expansion curves in the working cylinder. Cases of data synchronization calculation for low-speed two-stroke and mid-envelope four-stroke marine diesel engines are shown. Taking into account the assumptions made in practice, it was shown that at the point of maximum pressure growth rate on the compression curve, the cylinder volume above the piston can be calculated applying the known geometric dimensions of the cylinder and the P and $dP/d\varphi$ values obtained from the indicator diagram. The next step is to calculate the first approximation of the position of the top dead center of the piston, and the application of the digital filters is necessary. Finally, the synchronization problem is solved on the basis of the equation $dP/d\varphi = 0$, compiled for the section from the start of compression to the start of combustion in the cylinder. The selection of boundary conditions for modeling is shown. The advantage of applying the Powell'64 method is its high efficiency for quadratic functionals. Unlike gradient methods, the Powell'64 method does not require the calculation of derivatives and is universal to minimize complex nonlinear functionals of a general form. The original author's algorithm for data synchronization by analyzing indicator diagrams, which applies the Powell'64 method, is used in the latest versions of the D4.0HT marine diesel engine monitoring systems.

Keywords: non-gradient minimization; the Rosenbrock function; diesel engine operation; compression polytrope; functional.

Варбанець Роман Анатолійович – д-р техн. наук, професор, зав. каф. суднових енергетичних установок і технічної експлуатації, Одеський національний морський університет, Одеса, Україна, e-mail: roman.varbanets@gmail.com.

Белоусов Євген Вікторович – канд. техн. наук, доцент; декан судномеханічного факультету ХДМА, Херсонська державна морська академія, Херсон, Україна, e-mail: ewbelousov67@gmail.com.

Єриганов Олексій Валерійович – канд. техн. наук; доцент кафедри суднових енергетичних установок і технічної експлуатації, Одеський національний морський університет, Одеса, Україна, e-mail: a.yeryganov@gmail.com.

Кирнац Владислав Іванович – канд. техн. наук, в/о доц. каф. суднових енергетичних установок і технічної експлуатації, Одеський національний морський університет, Одеса, Україна, e-mail: kirnacsvlad@gmail.com.

Маулевич Владислав Олегович – ст. викл. каф. суднових енергетичних установок і технічної експлуатації, Одеський національний морський університет, Одеса, Україна, e-mail: vladyslavmaulevych@gmail.com.

Александровська Надія Ігорівна – канд. техн. наук, доцент кафедри суднових енергетичних установок і технічної експлуатації, Одеський національний морський університет, Одеса, Україна, e-mail: a.nadegda@gmail.com.

Varbanets Roman Anatolievich – Doctor of Technical Sciences, Professor; Head of the Chair "Marine Power Plants and Technical Operation", Odessa National Maritime University, Odessa, Ukraine, e-mail: roman.varbanets@gmail.com.

Belousov Yevgen Viktorovich – PhD, Assistant professor, dean of Kherson State Maritime Academy engineering faculty, Kherson State Maritime Academy, Kherson, Ukraine, e-mail: ewbelousov67@gmail.com.

Yeryganov Olexsiy Valeriyovich – PhD, Assistant professor of the Chair "Marine Power Plants and Technical Operation", Odessa National Maritime University, Odessa, Ukraine, e-mail: a.yeryganov@gmail.com.

Kyrnats Vladyslav Ivanovich – PhD, Assistant professor of the Chair "Marine Power Plants and Technical Operation", Odessa National Maritime University, Odessa, Ukraine, e-mail: kirnacsvlad@gmail.com.

Maulevych Vladyslav Olegovich – senior teacher of the Chair "Marine Power Plants and Technical Operation", Odessa National Maritime University, Odessa, Ukraine, e-mail: vladyslavmaulevych@gmail.com.

Aleksandrovskaya Nadiya Igorivna – PhD, Assistant professor of the Chair "Marine Power Plants and Technical Operation", Odessa National Maritime University, Odessa, Ukraine, e-mail: a.nadegda@gmail.com.