

**ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ ОПТИМІЗАЦІЇ
В ЗАДАЧАХ АНАЛІЗУ РОБОЧОГО ПРОЦЕСУ СУДНОВИХ ДИЗЕЛІВ**

Р.А. Варбанець

д.т.н., професор, зав. кафедри «Суднові енергетичні установки
і технічна експлуатація»

Одеський національний морський університет

Є.В. Белоусов

к.т.н., декан судномеханічного факультету

Херсонська державна морська академія (ХДМА)

О.В. Єриганов, В.О. Маулевич, Н.І. Александровська

викладачі кафедри «Суднові енергетичні установки
і технічна експлуатація»

І.П. Крижановська

аспірант кафедри «Морські та річкові порти, водні шляхи
та їх технічна експлуатація»

Одеський національний морський університет

Анотація. Розглянуто можливість застосування методу безградієнтної n -параметричної мінімізації Powell'64 в задачах моніторингу робочого процесу суднових дизелів. Наведені приклади пошуку глобального мінімуму тестової функції Розенброка. За допомогою методу Powell'64 мінімізуються функціонали МНК в задачах синхронізації і моделювання кривих стиснення-розширення в робочому циліндрі. Показані випадки розрахунку синхронізації даних для малооборотних двотактних і середньооборотних чотиритактних суднових дизелів. Завдання синхронізації вирішується на базі рівняння $P' = 0$, 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 суднових дизелів D4.0H.

Ключові слова: безградієнтна мінімізація, функція Розенброка, робочий процес дизеля, політропи стиснення, функціонал.

© Варбанець Р.А., Белоусов Є.В., Єриганов О.В., Маулевич В.О.,
Александровська Н.І., Крижановська І.П., 2018

**ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ОПТИМИЗАЦИИ
В ЗАДАЧАХ АНАЛИЗА РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА СУДОВЫХ ДИЗЕЛЕЙ****Р.А. Варбанец**д.т.н., профессор, зав. кафедрой «Судовые энергетические установки
и техническая эксплуатация»*Одесский национальный морской университет***Е.В. Белоусов**

к.т.н., декан судомеханического факультета

*Херсонская государственная морская академия
(ХГМА)***А.В. Ерыганов, В.О. Маулевич, Н.И. Александровская**
преподаватели кафедры «Судовые энергетические установки
и техническая эксплуатация»**И.П. Крыжановская**аспирант кафедры «Морские и речные порты, водные пути
и их техническая эксплуатация»*Одесский национальный морской университет*

Рассмотрена возможность применения метода безградиентной n -параметрической минимизации Powell'64 в задачах мониторинга рабочего процесса судовых дизелей. Приведен пример поиска глобального минимума тестовой функции Розенброка. С помощью метода Powell'64 минимизируются функционалы МНК в задачах синхронизации и моделирования кривых сжатия-расширения в рабочем цилиндре. Показаны случаи расчета синхронизации данных для малооборотных двухтактных и среднеоборотных четырехтактных судовых дизелей. Задача синхронизации решается на базе уравнения $P' = 0$, 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 расчета производных и является универсальным для минимизации сложных нелинейных функционалов общего вида. Оригинальный авторский алгоритм синхронизации данных путем анализа индикаторных диаграмм, в котором используется метод Powell'64, применен в последних версиях систем мониторинга судовых дизелей D4.0H.

Ключевые слова: безградиентная минимизация, функция Розенброка, рабочий процесс дизеля, политропа сжатия, функционал.

УДК 629.1.07+51-74

**APPLICATION OF THE OPTIMIZATION METHOD IN THE OBJECTIVES
OF THE ANALYSIS OF THE WORKING PROCESS OF SHIP DIESELS**

R.A. Varbanets

doctor of technical sciences, professor, head of the department
«Ship power plants and technical operation»

E.V. Belousov

Ph.D., the dean of the ship mechanics faculty

Kherson State Maritime Academy (KSMA)

A.V. Yeryganov, V.O. Maulevych, N.I. Aleksandrovskaya

teachers of the department «Ship power plants and technical operation»

I.P. Kryzhanovskaya

post-graduate student of the department
«Sea and river ports, waterways and their technical operation»

Odessa National Maritime University

The article touches upon the possibility of using the method of gradientless n -parametric minimization of Powell'64 in tasks of monitoring the working process of marine diesel engines. There is given an example of finding a global minimum of the Rosenbrock test function. Using the Powell'64 method, the Least-squares functionals in the synchronization and modelling tasks of compression-expansion curves in the working cylinder are minimized. The calculation results of data synchronization for low-speed two-stroke and medium-speed four-stroke marine diesel engines are shown. The synchronization problem can be solved in terms of equation $P' = 0$ derived for the sector from compression starting to combustion starting in the cylinder. The selection of the boundary conditions for simulation is shown. The advantage of Powell'64 method is its high efficiency for quadratic functionals. As opposed to gradient methods, the Powell'64 method does not require calculating derivatives and is universal for minimizing complex nonlinear general functionals. The original author's algorithm of data synchronization by analyzing the indicator diagrams using the Powell'64 method has been applied in the latest versions of monitoring systems of D4.0H marine diesel engine.

Keywords: *non-gradient minimization, the Rosenbrock function, diesel engine operation, compression polytrope, functional, the Least-squares method.*

Введення і постановка проблеми. Дослідження параметрів робочого процесу суднових 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 функцій часу в функції від кута повороту колінчастого вала

(ПКВ) [2; 3]. Для представлення індикаторних діаграм у вигляді $P(V)$, $P(\varphi)$ або $T(S)$ залежностей 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, знаючи геометрію циліндра і кривошипно-шатунного механізму (КШМ), відбувається перерахунок ПКВ в обсяги 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 складові цієї похибки наступні:

- вибірка мікролюфтів КШМ при знакомінному навантаженні;
- крутильні коливання і скручування колінчастого вала;
- хвильові ефекти і затримка сигналу тиску при пригоді їм 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 на середньооборотних СОД і до 12° ПКВ на високооборотних дизелях) [5]. А в зв'язку з тим, що всі переносні системи моніторингу використовують саме цей спосіб вимірювання тиску і це є звичайною практикою індиціювання 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 ВМТ і базується на застосуванні безградієнтної n-параметричної оптимізації Powell'64.

Стан проблеми. В результаті аналізу останніх публікацій і досліджень видно в першу чергу, що завдання визначення положення ВМТ є важливою складовою моніторингу робочого процесу, оскільки від точності її 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 запропоновані 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 фільтрів, заснованих на швидкому перетворенні Фур'є Low Pass FFT Filter [7]).

Попередній розрахунок положення ВМТ можна зробити, базуючись на роботі [8], в якій доводиться, що кут, який відповідає максимуму

першої похідної тиску на ділянці стискання, для даного двигуна є фактично сталою величиною.

В роботах [9; 10] показано, що 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. Гарний теоретичний висновок даного положення, на жаль, також складно використовувати на практиці, оскільки точність розрахунку обсягу камери стиснення і положення ВМТ сильно залежить від шумів записаної діаграми тиску. Застосування Low Pass фільтра [7] необхідно обґрунтовувати 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 положення 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 – межі 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'язаним напрямкам 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 двохпараметрична функція Розенброка часто використовується для тестування методів мінімізації в зв'язку з її специфічною формою. Її легко уявити візуально (рис. 1) – вона представляє собою вигнутий яр з крутими схилами і довгим слабо мінливим криволінійним дном. Її мінімум ($Z = 0$) знаходиться в точці $[x_1 = 1, x_2 = 1]$.

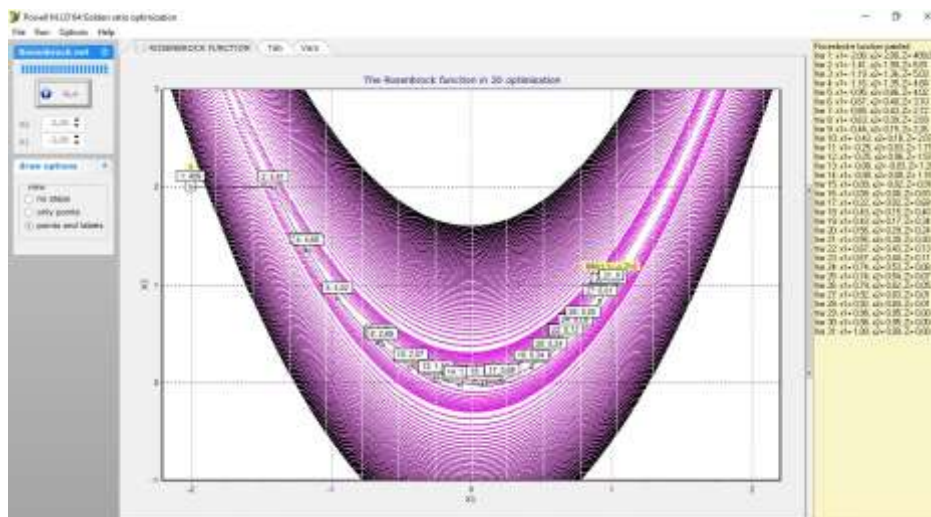


Рис. 1. Пошук мінімуму функції Розенброка [11]
за допомогою методу Powell'64 (копія екрану інтерфейсу тестового ПО)

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 все 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 цьому 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].

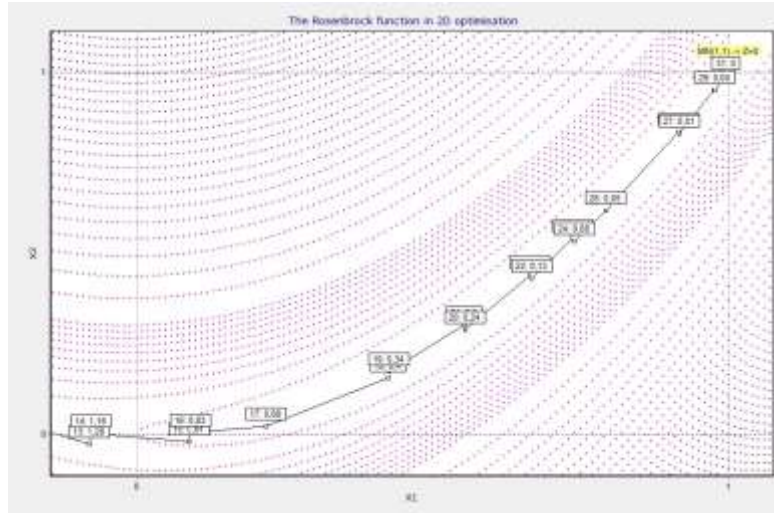


Рис. 2. Етапи пошуку функції Розенброка [11] в районі «точка мінімуму»
(копія екрану інтерфейсу тестового ПО)

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

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

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.

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

В даному випадку кількість загальних ітерацій при пошуку мінімуму функції Розенброка з поворотом осей в сполучених напрямках складо 31 (див. рис. 2). 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.

Найчастіше мінімізуємий функціонал являє собою складну нелінійну функцію загального вигляду або є результатом роботи алгоритму зі складною умовно змінюємою структурою. В цьому випадку для пошуку мінімуму такого функціоналу задаються граничні умови по незалежним змінним, в рамках яких повинен бути знайдений мінімум. Використання перших, а тим більше других похідних по незалежним змінним, часто виявляється незручним для дослідників, так як у більшості випадків дослідники модифікують свій алгоритм, і чисельне наближення похідних ускладнює процес досліджень, будучи джерелом помилок, які важко виявляються. Використання ж алгоритму Powell'64 не пов'язане з похідними і має ефективність, яка не поступається градієнтним методам [11; 12].

Алгоритм визначення ВМТ за допомогою рівняння $P'(\varphi) = 0$.

Для рішення цієї задачі використовується той факт, що при відсутності згоряння в циліндрі швидкість зміни тиску в ВМТ дорівнює нулю [5], за вирахуванням термодинамічної зміщення, пов'язаного з передачею тепла в стінки циліндра (рис. 3) [3; 10]

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

З урахуванням термодинамічного фазового зсуву в ВМТ ($\varphi = 0$) $\Theta = -\delta\varphi_T$.

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

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

де P_a – тиск на початку стиснення;

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

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

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

V_c – обсяг камери стиснення;

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

V_a – об'єм циліндра на початку стиснення;

n_1 – показник політропи стиснення.

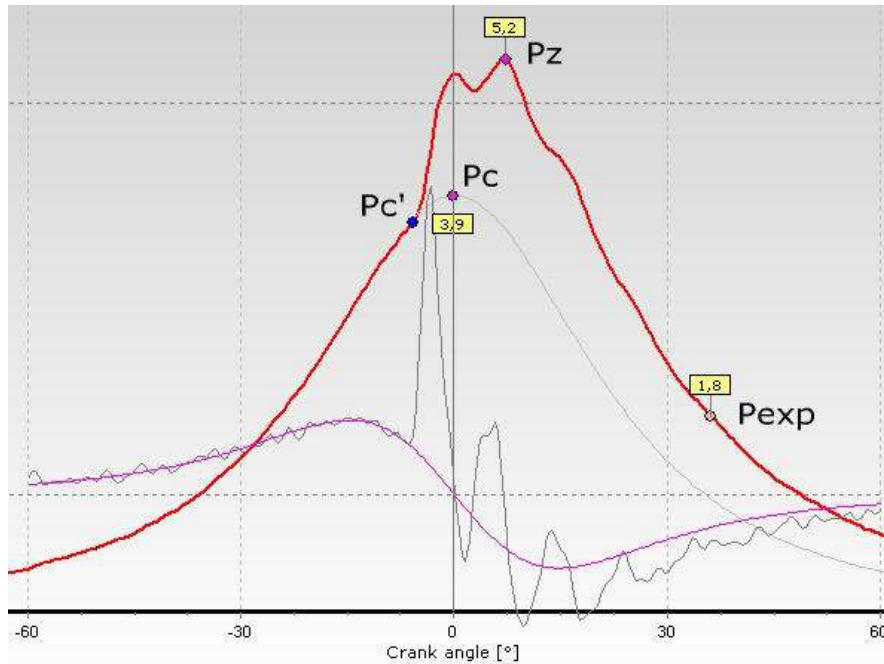


Рис. 3. Моделювання $dP/d\varphi$ на ділянці стиснення:
 P_c' – тиск початку згоряння; P_c – тиск в кінці стиснення;
 P_z – максимальний тиск згоряння палива;
 P_{exp} – тиск в точці 36° за ВМТ

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

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

Дійсний корінь рівняння (2) визначається за допомогою чисельного методу (наприклад, BISETT [11]) в діапазоні між абсциссами максимумів $P'(\varphi)$ на ділянках стискування і згоряння ($[P'^{\max 1}, P''^{\max 2}]$, 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' .

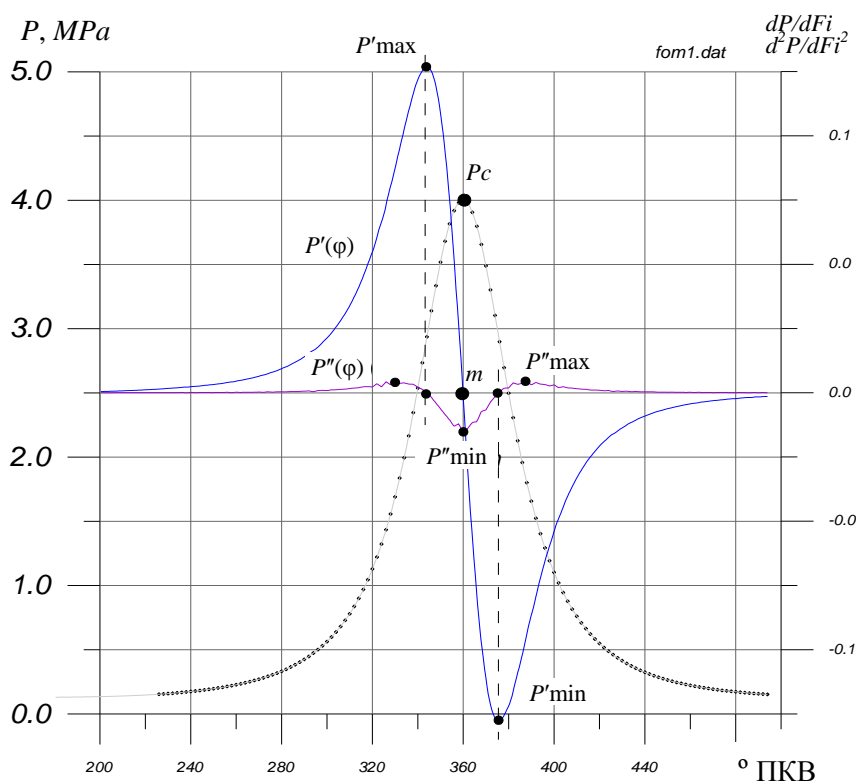


Рис. 4. Графіки $p(\varphi), p'(\varphi), p''(\varphi)$ стиснення-розширення СОД ЧН25/34

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

На графіку другої похідної (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 $P''(\varphi)$.

Для випадку аналізу довільного ряду значень тиску, де представлені кілька послідовно записаних в пам'ять робочих циклів, попередню оцінку значень ВМТ (точка m) кожного циклу зручніше проводити пошуком локальних мінімумів $d^2P/d\varphi^2 \rightarrow \min$ (рис. 4).

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

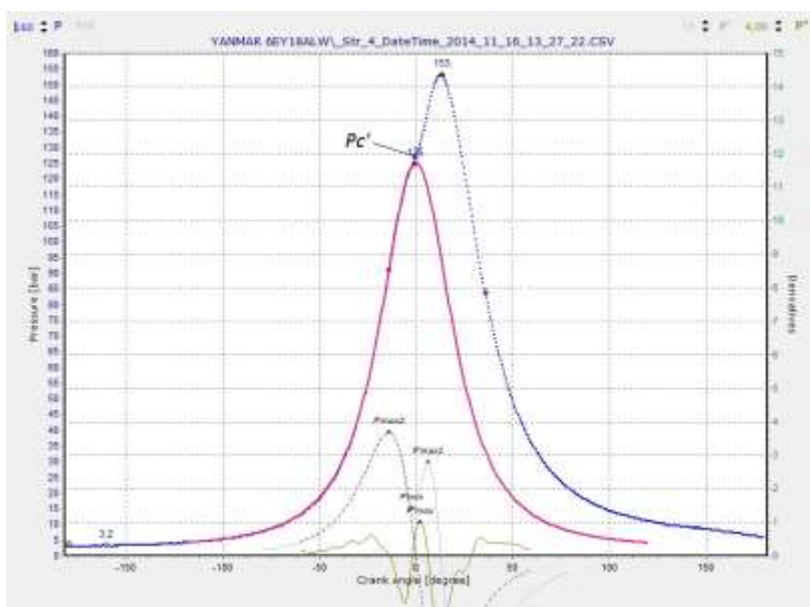


Рис. 5. Індикаторна діаграма $P(\varphi)$ і моделі P' , P'' середньооборотного дизеля Yanmar 6EY18ALW (копія екрану тестового ПО)

Ці координати розраховуються як позитивні коріння нелінійного рівняння $\frac{d^2P}{d\varphi^2} = 0$, де область визначення коренів $\varphi \in [2\pi - \Delta\varphi, 2\pi + \Delta\varphi]$, де $\Delta\varphi \leq 20^\circ$ ПКВ.

Для визначення лівої межі в попередній синхронізації по синусоїдальній моделі використовується ліва координата максимуму другої похідної. У цьому випадку проводиться пошук локального максимуму $\frac{d^2P}{d\varphi^2} \rightarrow \min$ на області визначення значень кутів φ

$$\varphi \in [2\pi - \Delta\varphi, 2\pi],$$

де $\Delta\varphi \leq 30^\circ$ ПКВ.

В кінцевому підсумку уточнювалися чисельні значення коефіцієнтів $dP_{comp}/d\varphi$, розраховані по записаним точкам 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 вирішення 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 впорскування палива в циліндр. Фазу початку згоряння P_c' було б зручно розглядати в якості правої межі, так як для цього достатньо наявності лише самої діаграми $P(\varphi)$ [13]. Однак якщо розглядати праву межу як фазу початку згоряння, то в ділянку 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 впорскування 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' , рис. 5).

Висновок. 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 (Phase Less Synchronization algorithm).

У всіх випадках, де проводився пошук локальних мінімумів і максимумів нелінійних функцій від двох і більше змінних, використовувався метод мінімізації по зв'язаних напрямках, що не використовує похідні – метод Powell'64. Метод виявився стійким навіть для випадку 7 % «зашумленість» даних білим шумом (оцінка рівня шумів для даних, отриманих системою D4.0H «корисний сигнал / шум» оцінюється в 3 %) [5; 13].

Незважаючи на те, що, по суті, метод Powell'64 – це метод пошуку з умовним закінченням ітерацій, вдалося сформулювати такі початкові умови, при яких загальний час виконання завдання синхронізації виявилося прийнятно малим (одиниці мілісекунд) для більшості сучасних контролерів.

Накопичений досвід роботи в області моніторингу робочого процесу судових дизелів дозволяє стверджувати наступне: використання PLS-алгоритму при практичному індиціюванні СДВЗ більш переважно з таких міркувань:

1) автоматичний облік похибок визначення ВМТ (установка фазового датчика і маркування маховика виконується на зупиненому двигуні. Під час роботи дизеля ВМТ зміщується через скручування колінчастого вала, пропорційно навантаженню збільшується на далеких від маховика циліндрах; через крутильні коливання; зазорів в КШМ та інших факторів, які неможливо врахувати в «статичі»):

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

- PLS-алгоритм автоматично враховує вплив невідповідності між справжнім станом ВМТ і маркуванням на маховику, що виникає внаслідок можливої неточності 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 виробляти індиціювання без попередньої підготовки двигуна (під час роботи з системами моніторингу робочого процесу, що використовують апаратну синхронізацію, найбільш трудомістка і тривала частина налаштування системи – установка фазового датчика і маркування маховика):

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

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

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

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Varbanets R., Karianskiy A. *Analyse of marine diesel engine performance // Journal of Polish CIMAC. Energetic Aspects. Gdansk: Faculty of Ocean Engineering and Ship Technology Gdansk University of Technology. 2012. – Vol. 7. – №. 1. – P. 269-275.*

2. Staś M. *An Universally Applicable Thermodynamic Method for T.D.C. Determination* // SAE Technical Paper 2000-01-0561, 2000. URL: <http://papers.sae.org/2000-01-0561/>. DOI: 10.4271/2000-01-0561.
3. Heywood J. B. *Internal Combustion Engine Fundamentals: First Edition*. McGraw-Hill Education, 1988. 930 p.
4. CCM – COMBUSTION MONITORING SYSTEM. URL: <http://www.imes.de/cms.html>.
5. Варбанец Р. А. *Диагностический контроль рабочего процесса судовых дизелей в эксплуатации: Дис. ... д-ра техн. наук. Одесса: Одес. национ. морск. акад., 2010. – 314 с.*
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 Paper 1999-01-1489, 1999. URL: <http://papers.sae.org/1999-01-1489/> DOI: 10.4271/1999-01-1489.
7. Butterworth filter. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Butterworth_filter
8. Ерыганов А.В., Варбанец Р.А. *Определение степени сжатия дизеля по результатам индицирования рабочего процесса* // *Вестн. Астрахан. гос. техн. ун-та. Сер.: Морская техника и технология. – 2017. – № 1. – С. 44-49.*
9. Семенов В.С. *Современные проблемы теории судовых дизелей. М.: В/О Мортехинформреклама, 1991. – 112 с.*
10. Ваншейдт В. А. *Судовые двигатели внутреннего сгорания. – Л.: Судостроение, 1977. – 392 с.*
11. Химмельблау Д. *Прикладное нелинейное программирование. – 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* // *Computer J. – 1964. – № 7. – P. 155.*
13. Варбанец Р.А., Головань А.И., Кучеренко Ю.Н. *Мониторинг частотных параметров судового дизеля с турбонаддувом* // *Вестн. Астрахан. гос. техн. ун-та. Сер.: Морская техника и технология. – 2013. – № 1. – С. 103-110.*
14. Белоусов Е.В. *Топливные системы современных судовых дизелей: Учебн. пособие. – Херсон: ХГМА, 2014. – 267 с.*

Стаття надійшла до редакції 26.03.2018 р.