

М.Є. Рибальченко, Є.В. Білоусов, А.П. Марченко, В.П. Савчук, В.П. Будко

ОБРОБКА ІНДИКАТОРНИХ ДІАГРАМ У ЗАДАЧАХ ПОБУДОВИ ЦИФРОВИХ ПРОФІЛІВ РОБОЧОГО ПРОЦЕСУ СУДНОВИХ ДВИГУНІВ

При експлуатації суднових двигунів внутрішнього згоряння широко застосовується процедура індиціювання робочого процесу на визначених режимах експлуатації з подальшим аналізом індикаторних діаграм та порівнянням отриманих результатів з еталонними, отриманими під час заводських випробувань двигуна. Однак загальна тенденція на світовому флоті до зменшення комерційних швидкостей суден з одного боку та використання жорстких графіків руху з іншого боку призвели до того, що в більшості випадків неможливо провести індиціювання за процедурами, прописаними в правилах технічної експлуатації двигунів. Таким чином, обслуговуючому персоналом втрачається можливість об'єктивно оцінювати поточний технічний стан двигуна та визначити необхідний перелік профілактичних заходів з технічного обслуговування та ремонту, що, безумовно, впливає на ефективність роботи двигунів та безпеку судноплавства загалом. Одним з ефективних шляхів вирішення цієї проблеми є застосування цифрових профілів робочих процесів двигуна, які характеризують їх перебіг у всьому діапазоні робочих режимів. За допомогою цифрового профілю можливо отримати розрахункову еталонну індикаторну діаграму, яка може бути використана для порівняння з отриманою під час планового індиціювання двигуна на будь-якому режимі його роботи. Основою для побудови цифрових профілів можуть слугувати результати приймально-здавальних стендових випробувань двигуна заводом-виробником. Однак враховуючи досить тривалий термін експлуатації суднових двигунів, протоколи випробувань зазвичай існують тільки в растровому форматі, що значно ускладнює обробку наведених у них результатів індиціювання, яке, частіш за все, виконувалося з застосуванням механічних індикаторів. Для використання цієї інформації для побудови цифрових профілів авторами була запропонована методика обробки таких індикаторних діаграм, викладена в попередніх статтях. Однак, ефективність формування цифрових профілів суттєво залежить від якості базових діаграм, по яких ці профілі будуються. Процедурі обробки таких діаграм присвячена дана стаття.

Ключові слова: суднові малооборотні двигуни; індикаторна діаграма; режим роботи; монотонна апроксимація.

Вступ

Обробка індикаторних діаграм та визначення за її результатами основних показників робочого процесу суднового двигуна внутрішнього згоряння є стандартною процедурою, яка відповідно до правил технічної експлуатації виконується машинним персоналом не рідше одного разу на місяць [1, 2]. Ця інформація переважно використовується для визначення поточного технічного стану двигуна, його енергетичних показників та правильності налаштувань основних механізмів та агрегатів [3]. Зазвичай для аналізу характеру перебігу робочого процесу отримані під час експлуатації індикаторні діаграми та результати їх обробки порівнюють з еталонними діаграмами, знятими під час випробувань двигуна на стенді заводу-виробника [1, 3].

Однак сучасні тенденції до зменшення комерційних швидкостей суден з метою економії палива та запровадження судноплавними компаніями жорстких графіків руху суттєво зменшують ефективність контролю за технічним станом двигунів шляхом їх індиціювання [4]. Це пов'язано з тим, що оцінка технічного стану двигунів ґрунтується на порівнянні отриманих під час експлуатації індикаторних діаграм з еталонними, отриманими під час стендових випробувань на фіксованих режимах їх роботи, які зазвичай відповідають максимальній експлуатаційній потужності (Maximal Continuous Rating – MCR) [2]. Але в реальних умовах індицію-

вання вимушено проводять на режимах, відмінних від MCR.

Розв'язання задачі отримання еталонних індикаторних діаграм для всього діапазону режимів роботи може бути здійснено шляхом застосування цифрових профілів робочих процесів, основаних на обробці результатів стендових випробувань [5]. Побудовані по базовим кривим цифрові профілі дозволяють отримати розрахункову еталонну індикаторну діаграму для будь-якого режиму [6]. Однак процедура відтворення базових кривих за результатами стендових випробувань потребує розв'язання декількох проміжних задач [7], одна з яких – обробка результатів цифрових масивів, отриманих шляхом оцифрування растрових зображень індикаторних діаграм, наведених у протоколах стендових випробувань [8].

Актуальність дослідження

Життєвий цикл суднових двигунів, зазвичай становить 25...40 років [9]. Стрімкий розвиток технічних засобів контролю робочого процесу протягом цього періоду призводить до того, що засоби індиціювання та методи обробки індикаторних діаграм зазнають суттєвих змін. Наприклад, на рис. 1 наведено результати індиціювання робочого процесу головного малооборотного двигуна 8K90MC-C, стендові випробування якого відбулися 21.03.2008 року [8]. Індиціювання виконувалося за допомогою механічного індикатору типу Maihak

[10] (рис. 2 а), а його результати в протоколі випробувань (Shop Test Report) подані в растровому форматі, що ускладнює їх використання як еталонних. У теперішній час двигун знаходиться в експлуатації [11], а планові індиціювання виконуються за допомогою електронного переносного діагностичного комплексу періодичної дії типу DPI (рис. 2 б), який формує електронний протокол випробувань [12].

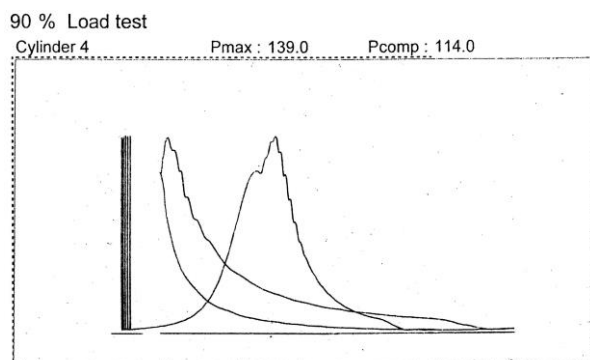


Рис. 1. Приклад растрового зображення індикаторних діаграм з протоколу стендових випробувань дизеля MAN 8K90MC-C (ML2046), побудованого концерном DOOSAN (стендові випробування якого відбулися 21.03.2008 року [8])

Таким чином, для використання результатів стендових випробувань як еталонних необхідна ефективна методика переведення інформації з растрового в цифровий формат.

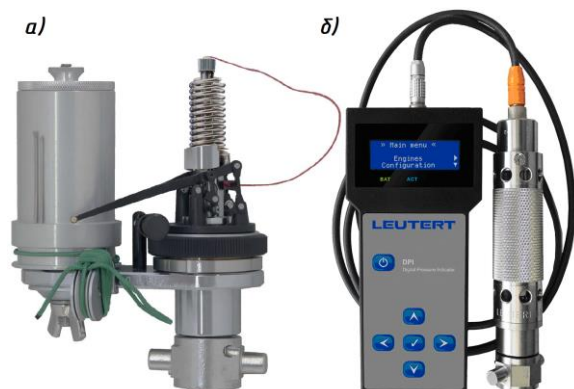


Рис. 2. Механічний (а) індикатор робочого процесу малооборотних дизелів (Type 50) та електронний індикатор типу DPI (б) виробництва фірми Friedrich Leutert GmbH & Co. KG [10, 12]

На сучасному ринку програмних продуктів представлено значну кількість програм, призначених для формування числових масивів за графічними зображеннями різних залежностей. До таких програмних продуктів відносяться: Get Data Graph Digitizer, Chart Reader, Graph, Post Graph Editor та інші, багато з яких знаходяться у вільному корис-

туванні. Авторами при розв'язанні задач переведення індикаторних діаграм з растрового в цифровий формат використовувалася програма Graph 2 Digit, яка належить до free software [13].

Враховуючи низьку якість самих растрових зображень (рис. 1), сформований по них числовий масив відрізняється суттєвою неоднорідністю, яка ускладнює подальший аналіз, особливо у випадку необхідності визначення динамічних показників (рис. 3, 4, 5).

Притаманна значна неоднорідність даних і системам електронного контролю за параметрами робочого процесу, що добре видно на рис. 4, де наведено результати індиціювання двигуна за допомогою електронної системи РМІ фірми MAN.

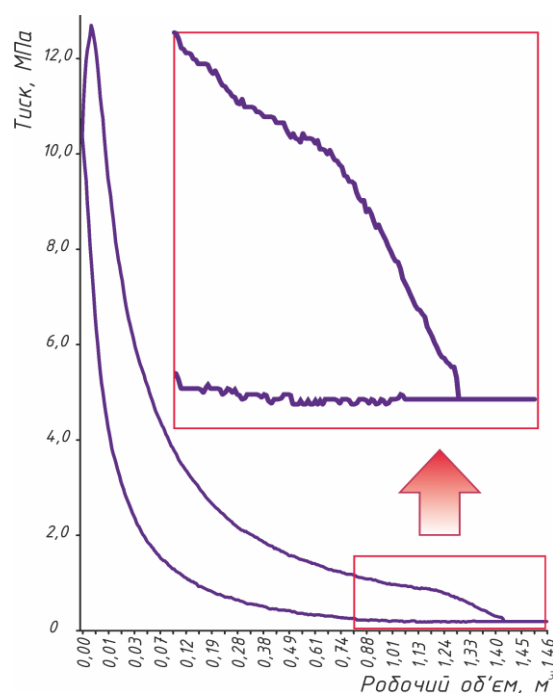


Рис. 3. Індикаторна діаграма робочого процесу в pV-координатах, побудована за результатами оцифрування растрового зображення

Саме така задача виникає при необхідності аналізу динамічності робочого процесу. Особливо це актуально для газодизельних малооборотних двотактних двигунів низького тиску [14, 15], робочий процес яких відбувається майже на межі детонації. Ці двигуни останнім часом отримують поширення на торговельному флоті, а особливості організації робочого процесу в них можуть призводити до значного «зашумлення» індикаторних діаграм, навіть отриманих електронними засобами моніторингу. Остання обставина суттєво ускладнює роботу вбудованих систем контролю за параметрами роботи та технічним станом елементів циліндропоршневої групи двигуна [16, 17]. Таким чином, ме-

тоди усунення неоднорідності сигналу в подальшому можуть знайти застосування в системах управління такими двигунами [18].

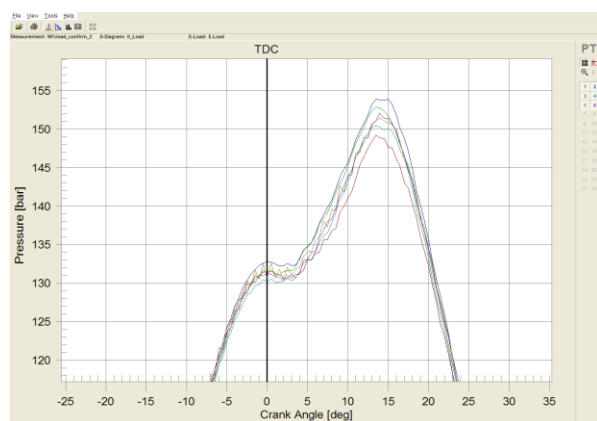


Рис. 4. Верхні частини індикаторних діаграм робочих процесів у рф-координатах, побудовані за результатами індичіювання з використанням електронної системи РМІ фірми MAN

Для усунення неоднорідності експериментальних даних при розв'язанні задач побудови цифрових профілів робочого процесу авторами було застосовано попередню обробку отриманих цифрових масивів з використанням методу монотонної апроксимації експериментальної залежності.

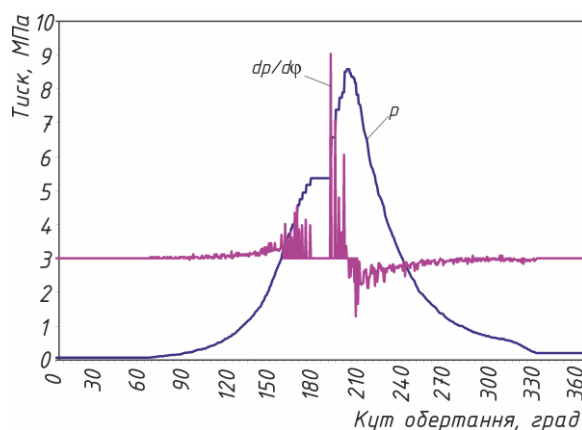


Рис. 5. Необроблена індикаторна діаграма, перебувана у рф-координати, та побудована по ній діаграма швидкості зростання тиску

Шляхи розв'язання проблеми

Під терміном «монотонна апроксимація» звичай розуміють два різних види апроксимації.

У першому випадку розглядається задача побудови апроксимуючої функції, яка зберігає проміжки монотонності експериментальної залежності. В другому випадку апроксимуюча функція повинна зберігати заданий характер монотонності, незважаючи на його можливі порушення в експериментальній залежності.

В подальшому під «монотонною апроксимацією» буде розумітися саме другий випадок.

Теоретичні моделі процесів, які відбуваються в циліндрах ДВЗ свідчать про те, що залежність тиску в робочому циліндрі від кута повороту колінчастого валу:

- на лінії стискування є зростаючою (неспадною) залежністю;
- на лінії розширення є спадною (незростаючою) залежністю.

Більш «м'які» визначення (неспадна та незростаюча залежності) означають можливу наявність горизонтальних ділянок графіку тиску.

Проте експериментальні індикаторні діаграми можуть містити локальні ділянки, на яких відповідна монотонність порушується. Тому при аналітичному описі таких діаграм необхідно розв'язувати задачу монотонної апроксимації в її другому розумінні. Для її розв'язання авторами використовується метод, запропонований у роботі [19].

Розробники методу відзначають п'ять його ключових особливостей, які відрізняють його від інших методів розв'язання вказаної задачі апроксимації.

Виділимо з них тільки ті, які мають безпосереднє значення для досліджуваної задачі.

Метод дозволяє будувати апроксимуючу функцію, яка зберігає вказаний характер монотонності, а також характер опуклості графіка функції на заданому проміжку.

Метод забезпечує перетворення обмежень для першої та другої похідної апроксимуючої функції у прості обмеження в просторі параметрів цієї функції. Оцінка похибки апроксимації може здійснюватися за допомогою обраного дослідником критерію. Метод однаково добре зарекомендував себе як при обробці вибірок великих об'ємів, так і при обробці розріджених експериментальних даних.

До апроксимуючої функції $f(x)$ висувається вимога неперервної диференційованості r разів на відрізку $[a; b]$, тобто $f(x) \in C^r [a; b]$, де $r \geq 1$.

В роботі [19] формулюються такі два обмеження щодо монотонності апроксимуючої функції та її опуклості (монотонності першого та другого порядку).

H₁. Апроксимуюча функція $f(x)$ задовольняє обмеженню монотонності першого порядку, якщо:

$$\gamma_1 f'(x) \geq 0, \quad x \in X, \quad (1)$$

де $\gamma_1 \in \mathbb{R}$.

H₂. Апроксимуюча функція $f(x)$ задовольняє обмеженню монотонності другого порядку, якщо:

$$\gamma_2 f''(x) \geq 0, \quad x \in X, \quad (2)$$

де $\gamma_2 \in \mathbb{R}$.

Апроксимуюча функція $f(x)$ одночасно задово-

льняє обмеженням монотонності H_1 і H_2 , якщо:

$$\min(\gamma_1 f'(x); \gamma_2 f''(x)) \geq 0, \quad x \in X, \quad (3)$$

для заданих $\gamma = (\gamma_1; \gamma_2)$.

Якщо параметри γ_1 або γ_2 (або обидва одночасно) дорівнюють нулю, відповідна вимога до монотонності апроксимуючої функції не висувається.

Не втрачаючи загальності, можна вважати, що γ_1 та γ_2 набувають значень $\{-1, 0, 1\}$.

У розглянутій задачі експериментальні дані доступні у вигляді n спостережень, що містять шум:

$$\begin{aligned} z &= \left\{ \left\{ x_j; y_j \right\}_{j=1}^n \right\}; \\ z_j &= (x_j; y_j); \\ y_j &= f(x_j) + \epsilon_j; \end{aligned}$$

де ϵ_j – реалізації нормально розподіленої випадкової величини з нульовим математичним сподіванням, яка моделює шум.

Якщо $s(x; \theta)$ – сім'я функцій, які використовуються для апроксимації, кожна з яких має свій індексований вектор параметрів θ зі скінченно вимірного простору параметрів Θ .

Похибка апроксимації оцінюється за нормою:

$$e(\theta|z) = \max_{j=1:n} \left| \omega_j (s(x_j; \theta) - y_j) \right|, \quad (4)$$

де ω_j – задані додатні ваги.

Оцінка похибки апроксимації (4) представляє собою максимальне абсолютне зважене відхилення апроксимуючої функції $s(x; \theta)$ від спостережених значень y_j в точках x_j .

Множина $\Theta_\gamma \subset \Theta$, яка містить параметри для функцій $s(x; \theta)$, які задовольняють умовам монотонності H_1 і H_2 при заданих значеннях $\gamma = (\gamma_1; \gamma_2)$, визначає область монотонності.

За вибіркою z при будь-якій похибці апроксимації $\epsilon \geq 0$ можна визначити множину $\hat{\Theta}_{\gamma, \epsilon} \subset \Theta_\gamma$, яка містить всі вектори параметрів θ , для яких максимальне абсолютне відхилення задовольняє:

$$e(\theta|z) \leq \epsilon.$$

Нижня границя ϵ не може бути меншою, ніж мінімум похибки, який досягається, тобто не може бути меншою, ніж значення, при якому множина $\hat{\Theta}_{\gamma, \epsilon}$ є не пустою. Верхня границя ϵ задається дослідником.

Ключова ідея методу з роботи [19] полягає в тому, щоб вибрати таку сім'ю апроксимуючих функцій $s(x; \theta)$, щоб обмеження (3) можна було перетворити в еквівалентні обмеження параметрів таким чином, щоб:

$$\min(\gamma_1 f'(x); \gamma_2 f''(x)) \geq 0 \Leftrightarrow \theta \in \Theta_\gamma \quad (5)$$

Такою властивістю володіє множина апроксимуючих функцій, яка є лінійним простором поліноміальних сплайнів степеня $k \geq 1$, заданих на відрі-

зку $[a; b]$ з упорядкованим вектором вузлів $(v_0; v_1; \dots; v_{k+1})$, де $a=v_0 < v_1 < \dots < v_{k+1}=b$.

Для довільного індексу $i \in (-k; \dots; k)$ позначимо за $N_{i, k+1}; [a; b] \Rightarrow R$ нормалізований В-сплайн степеня k з вузлами $(v_i; v_{i+1}; \dots; v_{i+k+1})$, при чому будемо вважати, що:

$$\begin{aligned} v_{-k} &= v_{-k+1} = \dots = v_{-1} = v_0 = a; \\ b &= v_{k+1} = v_{k+2} = \dots = v_{k+k} = v_{k+k+1}. \end{aligned}$$

Кожний сплайн s із вказаного вище простору може бути єдиним чином поданий у вигляді лінійної комбінації В-сплайнів:

$$s(x; \theta) = N_{k+1}(x) \cdot \theta \quad (6)$$

для всіх $x \in [a; b]$, де $\theta = (\theta_{-k}; \theta_{-k+1}; \dots; \theta_k)^T \in R^{k+k+1}$ – вектор коефіцієнтів В-сплайна; $N_{k+1} = (N_{-k, k+1}; N_{-k+1, k+1}; \dots; N_{k, k+1})$ – вектор-рядок, який складається з $k+k+1$ В-сплайнів, які є базисом вказаного простору сплайнів.

У роботі [19] за результатами досліджень сформульовано такий наслідок.

Нехай $k \in \{1; 2\}$, v – заданий вектор вузлів; s – сплайн, заданий у вигляді (6). Для будь-якого вектора $\gamma = (\gamma_1; \gamma_2)$ існує:

$$\begin{aligned} \min(\gamma_1 s^{(1)}(x); \gamma_2 s^{(2)}(x)) \geq 0 &\Leftrightarrow \\ \theta \in \Theta_\gamma &= \left\{ \theta \in R^{k+k+1} : M_\gamma \theta \geq 0 \right\}, \quad (7) \end{aligned}$$

де $M_\gamma = \begin{pmatrix} 0 & \gamma_1 I_k \\ 0 & \gamma_2 I_{k,0} \Delta'_k \end{pmatrix} \cdot L_{k+1}^{-1} \in R^{2(k+k) \times (k+k+1)}$; I_k – одинич-

на матриця розмірності $(k+k) \times (k+k)$; $I_{k,0}$ – одинична матриця розмірності $(k+k) \times (k+k)$, перший елемент якої дорівнює нулю; L_{k+1} – нижня трикутна матриця розмірності $(k+k+1) \times (k+k+1)$ з одиницями на місцях ненульових елементів;

$$\Delta'_k = \left(\text{diag}(v_1 - v_{-k+1}; \dots; v_{k+k} - v_k) \cdot L_k \right)^{-1}.$$

Цей наслідок визначає область монотонності Θ_γ . В ньому сформульовані необхідні та достатні умови обмеження параметрів для відповідних апроксимуючих функцій з тим, щоб задовольнити вимоги монотонності H_1 та H_2 .

Критерії перевірки можна сформулювати наступним чином: чи задовольняє експериментальна послідовність вимогам монотонності першого та другого порядку, які аналогічні вимогам H_1 та H_2 . Для цього замінимо вирази похідних в формулах (1) та (2) їх дискретними аналогами.

\hat{H}_1 . Для обраної константи γ_1 вибірка z задовольняє умові монотонності розподіленої різниці першого порядку, якщо:

$$\gamma_1 \delta_j(z) \equiv \gamma_1 \cdot \frac{y_{j+1} - y_j}{x_{j+1} - x_j} \geq 0, \quad (8)$$

де $j \in (1; \dots; n-1)$.

\hat{H}_2 . Для обраної константи γ_1 вибірка z задовольняє умові монотонності розподіленої різниці другого порядку, якщо:

$$\gamma_2 \delta_j^2(z) \equiv \gamma_2 \cdot \left(\frac{y_{j+1} - y_j}{x_{j+1} - x_j} - \frac{y_j - y_{j-1}}{x_j - x_{j-1}} \right) \geq 0, \quad (9)$$

де $j \in (2; \dots; n-1)$.

В загальному випадку немає підстав вважати, що експериментальні дані вибірки z , завжди задовольняють вимогам монотонності (8) та (9).

При додатній похибці апроксимації неов'язково строго задовольняти вимоги \hat{H}_1 та \hat{H}_2 .

Визначимо ε -послаблення вимог \hat{H}_1 та \hat{H}_2 , які позначимо $\hat{H}_{1\varepsilon}$ та $\hat{H}_{2\varepsilon}$.

Ці послаблені вимоги визначають, чи можна задану вибірку z перетворити на вибірку $\hat{z} = \{(x_j; \hat{y}_j)\}_{j=1}^n$ так, щоб нова вибірка \hat{z} задовольняла послабленим вимогам $\hat{H}_{1\varepsilon}$ та $\hat{H}_{2\varepsilon}$ і в той же час відстань між точками вибірок z та \hat{z} по верхній нормі не перевищувала ε .

У послаблених вимогах $\hat{H}_{1\varepsilon}$ та $\hat{H}_{2\varepsilon}$ розглядаються дві задачі лінійного програмування і вимагається, щоб їх розв'язки дорівнювали нулю.

$\hat{H}_{1\varepsilon}$. Вибірка z задовольняє ε -послабленню вимоги \hat{H}_1 , якщо розв'язок задачі лінійного програмування:

$$\left\{ \begin{array}{ll} \min_{t, \hat{y}} \sum_{i=1}^n t_i & \text{s.t.} \quad -\gamma_1(\hat{y}_{j+1} - \hat{y}_j) \leq t_j \\ (1 \leq i \leq n) & 0 \leq t_i \\ (1 \leq j \leq n-1) & -\varepsilon \leq \omega_i(\hat{y}_i - y_i) \leq \varepsilon \end{array} \right\}$$

дорівнює нулю, для заданих $\varepsilon \geq 0$; $\gamma_1 = \{-1; 0; 1\}$.

$\hat{H}_{2\varepsilon}$. Вибірка z задовольняє ε -послабленню вимоги \hat{H}_2 , якщо розв'язок задачі лінійного програмування:

$$\left\{ \begin{array}{ll} \min_{t, \hat{y}} \sum_{i=1}^n t_i & \text{s.t.} \quad -\gamma_2 \left(\frac{\hat{y}_{j+1} - \hat{y}_j}{x_{j+1} - x_j} - \frac{\hat{y}_j - \hat{y}_{j-1}}{x_j - x_{j-1}} \right) \leq t_j \\ (1 \leq i \leq n) & 0 \leq t_i \\ (2 \leq j \leq n-1) & -\varepsilon \leq \omega_i(\hat{y}_i - y_i) \leq \varepsilon \end{array} \right\}$$

дорівнює нулю, для заданих; $\varepsilon \geq 0$; $\gamma_2 = \{-1; 0; 1\}$.

Вибірка z задовольняє ε -послабленням вимог \hat{H}_1 та \hat{H}_2 одночасно, якщо задачі лінійного програмування у вимогах $\hat{H}_{1\varepsilon}$ та $\hat{H}_{2\varepsilon}$ допускають спільний розв'язок $(t; \hat{y}) = (t_1; \dots; t_n; \hat{y}_1; \dots; \hat{y}_n)$ і їх відповідні оптимальні значення дорівнюють нулю.

Ці умови можна використовувати для того, щоб гарантувати існування непустої множини $\hat{\Theta}_{\gamma;\varepsilon}$.

Нехай задані $\varepsilon \geq 0$; $\gamma_1 = \{-1; 0; 1\}$. Якщо вибірка z задовольняє послабленій вимозі $\hat{H}_{1\varepsilon}$, тоді існує такий набір вузлів v , що множина $\hat{\Theta}_{\gamma;\varepsilon}$ є не пустою для $\gamma = (\gamma_1; 0)$.

Аналогічно формулюються твердження для послабленої вимоги $\hat{H}_{2\varepsilon}$ та для одночасного виконання послаблених вимог $\hat{H}_{1\varepsilon}$ та $\hat{H}_{2\varepsilon}$.

Останні твердження конструктивно доводяться

в додатках до статті [19], тобто ці доведення містять алгоритми побудови згадуваних вище векторів вузлів v .

Застосування методу монотонної апроксимації до обробки індикаторних діаграм

Як вже відзначалося, теоретичні моделі процесів, які відбуваються в циліндрах ДВЗ, свідчать про те, що залежність тиску в циліндрі від кута повороту колінчастого валу на лінії стискування є зростаючою залежністю, а на лінії розширення є спадною залежністю.

Однак це не виключає можливості наявності горизонтальних ділянок графіку тиску. Відповідно на лінії стискування можемо спостерігати неспадну залежність, а на лінії розширення – незростаючу.

Крім того, експериментальні індикаторні діаграми можуть містити локальні ділянки, на яких відповідна монотонність порушується. Причини порушення можуть мати як випадковий характер, так і свідчити про порушення в роботі двигуна. Тому при обробці експериментальних залежностей ці два випадки повинні бути відокремлені на початку досліджень.

Алгоритм побудови апроксимуючого монотонного сплайна може бути застосований як при обробці індикаторних діаграм у pV -координатах, так і в $p\phi$ -координатах. Тому при його викладенні будемо вважати, що на вертикальній осі Oy відкладається тиск, а на горизонтальній осі Ox – об'єм робочого тіла V або кут повороту колінчастого валу ϕ (в залежності від виду діаграми, що обробляється). Тому надалі викладення основних кроків алгоритму здійснюється при позначенні досліджуваних залежностей як $y=f(x)$.

Експериментальні дані з лінії стискування та розширення обробляються окремо. Для спрощення викладення матеріалу надалі мова йде про ділянки ліній стискування та розширення, на яких зберігається характер монотонності обох порядків.

На першому кроці здійснюється оцінка відповідності отриманої експериментальної залежності:

$$z = \{(x_j; y_j)\}_{j=1}^n,$$

де n – об'єм експериментальної вибірки, умовам монотонності першого та другого порядків.

Для цього розв'язується задача оптимізації

$$\sum_{i=1}^{n-1} t_i + \sum_{j=2}^{n-1} t_j \rightarrow \min, \quad (10)$$

за функціональних обмежень:

$$\left\{ \begin{array}{ll} -\gamma_1 \cdot (\hat{y}_{j+1} - \hat{y}_j) \leq t_j, & i = 1 \dots (n-1); \\ -\gamma_2 \cdot \left(\frac{\hat{y}_{j+1} - \hat{y}_j}{x_{j+1} - x_j} - \frac{\hat{y}_j - \hat{y}_{j-1}}{x_j - x_{j-1}} \right) \leq t_j, & j = 2 \dots (n-1); \end{array} \right.$$

та параметричних обмежень:

$$\begin{cases} t_i \geq 0, & i = 1 \dots (n-1); \\ \gamma_j \geq 0, & j = 2 \dots (n-1); \\ \omega_k \cdot |\hat{y}_k - y_k| \leq \varepsilon, & k = 1 \dots n; \end{cases}$$

де ω_k – задані додатні ваги; \hat{y}_k – ординати точок нової (згладженої) вибірки, яка задовольняє висунутим вимогам до монотонності; ε – припустиме відхилення між ординатами точок початкової залежності та згладженої.

Об'єктивно вектор ваг може бути визначений на підставі закону великих чисел, тобто при наявності достатньої кількості вибірок, отриманих в однакових умовах проведення експериментальних досліджень. В даному дослідженні всі ваги приймалися рівними одиниці.

Вектор параметрів $\{\gamma_1; \gamma_2\}$ відповідно до розв'язуваних задач може мати координати:

$\{-1; 1\}$ – для задачі згладжування експериментальної індикаторної діаграми в pV -координатах як

на лінії стискування, так і на лінії розширення (оскільки в обох випадках залежність є спадною і має увігнутий графік);

$\{1; 0\}$ – для задачі згладжування експериментальної індикаторної діаграми в $p\phi$ -координатах на лінії стискування (залежність є неспадною, а її характер увігнутості змінюється);

$\{-1; 0\}$ – для задачі згладжування експериментальної індикаторної діаграми в $p\phi$ -координатах на лінії розширення (залежність є незростаючою зі змінним характером увігнутості).

За твердженнями, доведеними в роботі [19], згладжена залежність задовольняє висунутим вимогам до монотонності першого та другого порядків і відхиляється від експериментальної залежності не більше, ніж на вказане число ε , коли мінімальне значення функції цілі (10) дорівнює нулю.

Ненульове мінімальне значення функції цілі (10) означає, що початкова експериментальна залежність має суттєві відхилення від очікуваних характеристик. В цьому випадку потрібен фаховий аналіз можливих причин таких відхилень або збільшення припустимої величини відхилень ε .

Для подальших досліджень використовується згладжена вибірка $\hat{z} = \{(x_j; \hat{y}_j)\}_{j=1}^n$, яку отримують за результатами розв'язання задачі оптимізації (1). Оскільки згладжена вибірка задовольняє вимогам монотонності на відповідних ділянках, тому на її основі можна будувати інтерполяційний сплайн, що зберігає форму дискретної залежності.

Даний алгоритм було реалізовано авторами в програмному середовищі СКМ Maple.

На рис. 6 наведено приклад монотонного згладжування індикаторної діаграми у pV -координатах за розглянутим алгоритмом.

Після отримання аналітичного опису індикаторних діаграм у вигляді вказаних сплайнів (зі збереженням характеру монотонності) прямий та обернений перерахунок між pV та $p\phi$ координатами здійснюється на їх основі.

Оброблена за допомогою описаного вище алгоритму аналітична залежність тиску від об'єму робочого циліндра дозволяє визначити значення тиску для всіх значень об'ємів, які відповідають кутам повороту колінчатого валу, відтворивши індикаторну діаграму в $p\phi$ -координатах.

Оброблена таким чином індикаторна діаграма цілком придатна для подальшого аналізу з використанням стандартних методик визначення основних показників та залежностей робочого процесу.

На рис. 7 наведена діаграма в $p\phi$ -координатах, перебудована з обробленої за розглянутою методикою діаграми в pV -координатах, що відповідає випадку наведеному на рис. 5.

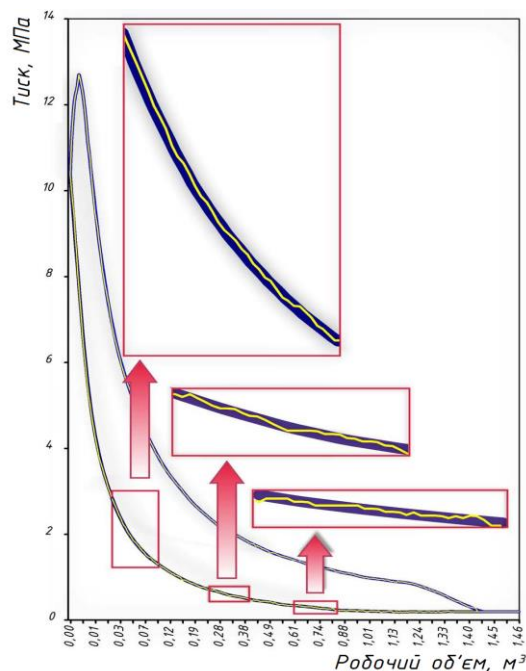


Рис. 6. Індикаторна діаграма в pV -координатах до монотонного згладжування (жовта лінія) та після монотонного згладжування (синя лінія) (за результатами випробувань двигуна 8K90MC-C, No D?-MLI-2046, побудованого в 2008 році корпорацією DOOSAN-MAN Diesel, на навантаженні 75% від MCR)

Можна бачити, що монотонне згладжування дозволяє усунути недоліки, які виникають під час отримання та попередньої обробки експериментальних даних.

Якщо на рис. 5, аналіз динамічності робочого процесу зробити практично неможливо, то після обробки, побудована по лінії зміни тиску крива

швидкості, має чітко визначені ділянки, які відповідають окремим стадіям робочого процесу.

Відповідним чином оброблені результати оцифровки растрових зображень індикаторних діаграм, отриманих під час стендових випробувань двигунів, були використані авторами для побудови цифрових профілів робочого процесу, що дозволяє контролювати технічний стан двигуна шляхом його індичіювання незалежно від режиму роботи.

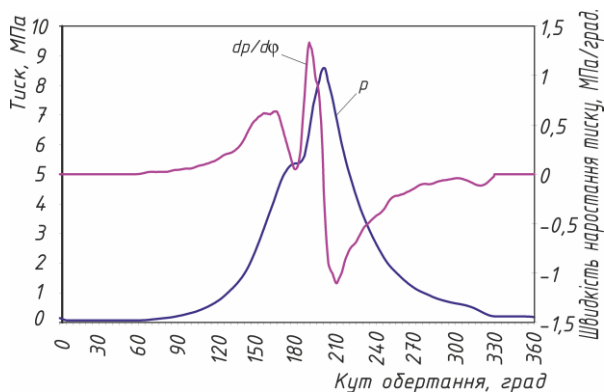


Рис. 7. Оброблена за запропонованою методикою індикаторна діаграма, перебудована в рф-координати, та побудована по ній діаграма швидкості зростання тиску

Висновки

Одним із шляхів розв'язання науково-практичної задачі оцінки технічного стану суднових малооборотних двигунів за параметрами робочого процесу є розробка методики побудови цифрових профілів, які описують залежність характеру перебігу робочого процесу від навантаження двигуна. Основним джерелом інформації для побудови таких профілів є індикаторні діаграми, отримані під час стендових випробувань двигуна заводом-виробником. Така інформація в більшості випадків існує тільки в растровому форматі, а її переведення в цифровий формат призводить до значної неоднорідності отриманих числових масивів, що ускладнює, а в деяких випадках унеможливує, подальше використання даної інформації. У зв'язку з цим важливою складовою задачі створення цифрового профілю є попередня обробка експериментальних даних. Для усунення зазначеної неоднорідності при розв'язанні задач побудови цифрових профілів робочого процесу авторами було застосовано попередню обробку отриманих цифрових масивів з використанням методу монотонної апроксимації експериментальної залежності.

В роботі викладені основні теоретичні положення щодо застосування даної методики. Показано, що після монотонного згладжування отримані індикаторні діаграми можна обробляти з застосу-

ванням стандартних методик, що використовуються для аналізу робочого процесу. Також вони можуть бути використані як базові криві для побудови цифрових профілів.

Список літератури:

1. Правила технічної експлуатації морських і річкових суден. Дизелі. Нормативний документ морського транспорту України. Дата введення: 01.02.1997. – 63 с. 2. Суворов П. С. Судовые двигатели внутреннего сгорания и их техническая эксплуатация. – Одесса: ОНМА, 2017. – 473 с. 3. Варбанец Р.А. Диагностический контроль рабочего процесса судовых дизелей в эксплуатации: дисс. докт. техн. наук / Р.А. Варбанец – Одесса: Одесская национальная морская академия, 2010. – 314 с. 4. Sartini N. More haste, less speed / N. Sartini // Container ship focus. – 2008. – Issue 5. – P. 3. 5. Білоусов С. В. Розробка методів оцінки технічного стану двигунів за результатами індичіювання робочого процесу на режимах відмінних від номінальних / С. В. Білоусов, А. П. Марченко, М. С. Рибальченко, В. П. Савчук, Г. Я. Тулущенко // Двигуни внутрішнього згоряння. – 2022. – № 1. – С 51–59, doi: 10.20998/0419-8719.2022.1.07 6. Рибальченко М. С. Використання числових профілів робочого процесу для аналізу ефективності роботи суднового малооборотного двигуна на режимах часткових навантажень / С. В. Білоусов, М. С. Рибальченко // Розвиток транспорту. 2022. – № 3(14). – С. 97–100, doi.org/10.33082/td.2022.3-14.08 7. Belousov E. Digital Profiles of Work Processes of a Marine Engine for Calculated Indicator Diagrams in Operating Modes Other than Maximum Continuous Rating / E. Belousov, A. Marchenko, M. Rybalchenko, G. Tuluchenko et al // SAE Technical Paper. – 2023-01-5008, doi:10.4271/2023-01-5008. 8. Shop Test Report of Marine Low Speed Diesel Engine Type: Doosan Man B&W 8K90MC-C, Project name DANA 1671, test date 21.03.2008. – 68 p. 9. Bilousov I. Modern Marine Internal Combustion Engines / I. Bilousov, M. Bulgakov, V. Savchuk. – Springer Series on Naval Architecture, Marine Engineering, Shipbuilding and Shipping, Springer, Cham., 2020, doi.org/10.1007/978-3-030-49749-1. 10. Engine Indicators Type 50 and Type 30 – Operating Instructions. Part-No. 4651.98.00020. – Friedrich Leutert GmbH & Co., Germany, Adendorf, 2017. 11. Рибальченко М. С. Використання числових профілів робочого процесу для аналізу ефективності роботи суднового малооборотного двигуна в умовах сучасної тенденції щодо зниження експлуатаційної швидкості суден / С. В. Білоусов, М. С. Рибальченко // Водний транспорт. – 2022. – Випуск 2(36). – С. 71–83, doi: 10.33298/2226-8553.2022.2.36.06 12. DPI-2 Digital Pressure Indicator Operating Instructions. DPI hand-held unit, version 2.04. – Friedrich Leutert GmbH & Co. KG, Germany, Adendorf, 2014. 13. Plisko V. Graph2Digit [Електронний ресурс] – Режим доступу : <http://plsoft.narod.ru/digitizer>. – Дата перегляду : 01.10.2022. 14. Belousov E. Research of the Gas Fuel Supply Process on the Compression Stroke in Ship's Low-Speed Gas-Diesel Engines / E. Belousov, A. Marchenko, I. Gritsuk, V. Savchuk // SAE Technical Paper 2020-01-2107. – 2020, doi:10.4271/2020-01-2107. 15. Білоусов Е. В. Организация внутреннего смецеобразования в судовых малооборотных газодизельных двигателях / Е. В. Белоусов, В. П. Савчук, И. В. Грицук, Т. П. Белоусова // Двигатели внутреннего сгорания. – 2017. – № 2. – С. 13–16. 16. Saraiev O.

Automated Diagnostic System for Engine Cylinder-Piston Group / O. Saraiev, I. Saraieva, I. Gritsuk, V. Volkov, et al. // *SAE Technical Paper 2020-01-2022*, doi:10.4271/2020-01-2022. 17. Pawletko R. *Evaluation of Current Developments and Trends in the Diagnosis of Marine Diesel Engines Based on the Indicator Diagrams Analysis* / R. Pawletko, S. Polanowski // *Journal of KONES Powertrain and Transport*. 2014. – V. 21. – № 4. – P. 389–396, doi: 10.5604/12314005.1130492 18. Белоусов Е. В. *Исследование процессов топливоподачи в газодизельных малооборотных двухтактных двигателях низкого давления* / Е. В. Белоусов, Р. А. Варбанец, В. П. Савчук., И. В. Гришук, В. С. Вербовский // *Двигатели внутреннего сгорания*. – 2019. – № 1. – С 27–33, doi: 10.20998/0419-8719.2019.1.05. 19. Chehrizi N., Weber T. A. *Monotone Approximation of Decision Problems* / N. Chehrizi, T. A. Weber // *Operations Research*. – 2010. – V. 58. – I. 4. – Part 2. – P. 1158–1177, doi: 10.2139/ssrn.1324024

Bibliography (transliterated):

1. *Rules for the technical operation of sea and river vessels. Diesels. Normative document of maritime transport of Ukraine. Date of introduction: 01.02.1997. [Pravyla tekhnichnoi ekspluatatsii morskyykh i richkovyykh suden. Dyzeli. Normatyvnyi dokument morskoho transportu Ukrainy. Data vvedennia: 01.02.1997.]* 2. Suvorov, P. S. (2017), 'Marine Internal Combustion Engines and Their Technical Operation' [Sudovyye dvigateli vnutrennego sgoraniya i ih tekhnicheskaya ekspluatatsiya], Odessa: ONMA. 3. Varbanets, R. A. (2010), 'Diagnostic Control of the Working Process of Marine Diesel Engines in Operation' [Dyagnosticheskiy kontrol rabocheho protsessa sudovyykh dizeley v ekspluatatsii]. Thesis of Dr. tech. Sciences, Odessa National Maritime Academy, Odessa. 4. Sartini N. (2008), 'More haste, less speed'. *Container ship focus*, 5, pp. 3. 5. Bilousov Ye. V., Marchenko A. P., Rybalchenko M. Ye., Savchuk V. P., Tuluchenko H. Ya. (2022), 'Development of Methods for Evaluation of Technical Condition of Engines According to the Results of Indication of Working Process on Modes Different from Nominal' [Rozrobka metodiv otsinky tekhnichnoho stanu dyvuhuniv za rezul'tatamy indytsiuivannia robochoho protsesu na rezhymakh vidminnykh vid nominalnykh]. *Internal Combustion Engines*, 1, pp. 51–59, doi: 10.20998/0419-8719.2022.1.07 6. Rybalchenko M. Ye., Bilousov Ye. V. (2022), 'Usage of Numerical Profiles of the Work Process to Analyze the Efficiency of the Ship's Low-Speed Engine at Partial Loads' [Vykorystannia chyslovykh profiliv robochoho protsesu dlia analizu efektyvnosti roboty sudnovoho maloobertovoho dyvuhuna na rezhymakh chastkovykh navantazhen]. *Transport Development*, 3(14), pp. 97–100, doi.org/10.33082/td.2022.3-14.08 7. Bilousov E., Marchenko A., Rybalchenko M., Tuluchenko G. et al.

(2023), 'Digital Profiles of Work Processes of a Marine Engine for Calculated Indicator Diagrams in Operating Modes Other than Maximum Continuous Rating'. *SAE Technical Paper*, 2023-01-5008, doi:10.4271/2023-01-5008. 8. *Shop Test Report of Marine Low Speed Diesel Engine Type: Doosan Man B&W 8K90MC-C, Project name DANA 1671, test date 21.03.2008*, 68 p. 9. Bilousov I., Bulgakov M., Savchuk V. (2020), *Modern Marine Internal Combustion Engines*. Springer Series on Naval Architecture, Marine Engineering, Shipbuilding and Shipping, Springer, Cham., doi.org/10.1007/978-3-030-49749-1. 10. *Engine Indicators Type 50 and Type 30 – Operating Instructions. Part-No. 4651.98.00020*. – Friedrich Leutert GmbH & Co., Germany, Adendorf, 2017. 11. Rybalchenko M. Ye., Bilousov Ye. V. (2022), 'Use of Numerical Profiles of the Working Process for the Analysis of the Efficiency of Work of a Ship's Low-Speed Engine Under the Conditions of the Current Tendencies to Reduce the Operating Speed of Vessels' [Vykorystannia chyslovykh profiliv robochoho protsesu dlia analizu efektyvnosti roboty sudnovoho maloobertovoho dyvuhuna v umovakh suchasnoi tendentsii shchodo znyzhennia ekspluatatsiinoi shvydkosti suden]. *Water Transport*, 2(36), pp. 71–83, doi: 10.33298/2226-8553.2022.2.36.06 12. *DPI-2 Digital Pressure Indicator Operating Instructions. DPI hand-held unit, version 2.04*. – Friedrich Leutert GmbH & Co. KG, Germany, Adendorf, 2014. 13. Plisko V. *Graph2Digit*. Available at : <http://plsoft.narod.ru/digitizer> (Accessed : October 1, 2022). Bilousov E., Marchenko A., Gritsuk I., Savchuk V. et al. (2020), 'Research of the Gas Fuel Supply Process on the Compression Stroke in Ship's Low-Speed Gas-Diesel Engines'. *SAE Technical Paper 2020-01-2107*, doi:10.4271/2020-01-2107. Bilousov E. V., Savchuk V. P., Gritsuk I. V., Belousova T. P. (2017), 'Organization of Internal Mixing in Marine Low-Revving Gas-Diesel Engines' [Organizatsiya vnutrennego smeseobrazovaniya v sudovyykh maloobortnykh gazodizelnykh dvigatelyakh]. *Internal Combustion Engines*, 2, pp. 13–16. Saraiev O., Saraieva I., Gritsuk I., Volkov V. et al. (2020), 'Automated Diagnostic System for Engine Cylinder-Piston Group'. *SAE Technical Paper 2020-01-2022*, doi:10.4271/2020-01-2022. 17. Pawletko R., Polanowski S. (2014), 'Evaluation of Current Developments and Trends in the Diagnosis of Marine Diesel Engines Based on the Indicator Diagrams Analysis'. *Journal of KONES Powertrain and Transport*, 21, 4, pp. 389–396, doi: 10.5604/12314005.1130492 Bilousov E. V., Varbanets R. A., Savchuk V. P., Gritsuk I. V., Verbovskiy V.S. (2019), 'Investigation of Fuel Supply Processes in Gas-Diesel Low-Revving Two-Stroke Engines' [Issledovanie protsessov toplivopodachi v gazodizelnykh maloobortnykh dyvuhunakh nizkogo davleniya]. *Internal Combustion Engines*, 1, pp. 27–33, doi: 10.20998/0419-8719.2019.1.05. 19. Chehrizi N., Weber T. A. (2010), 'Monotone Approximation of Decision Problems'. *Operations Research*, 58, 4, Part 2, pp. 1158–1177, doi: 10.2139/ssrn.1324024

Надійшла до редакції 08.06.2023 р.

Рибальченко Микола Євгенович – аспірант кафедри експлуатації суднових енергетичних установок, Херсонська державна морська академія, Україна, kolryb73@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-3533-3967>.

Білоусов Євген Вікторович – доктор техн. наук, професор, професор кафедри експлуатації суднових енергетичних установок, Херсонська державна морська академія, Україна, ewbelousov67@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-8185-8209>.

Марченко Андрій Петрович – доктор техн. наук, професор, проректор з наукової роботи НТУ (ХП), Національний технічний університет (ХП), Україна, andreymarchenko51@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0001-9746-4634>.

Савчук Володимир Петрович – канд. техн. наук, доцент, завідувач кафедри експлуатації суднових енергетичних установок, Херсонська державна морська академія, Україна, postsavchuk@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-5266-850X>.

Бутко Вадим Петрович – аспірант кафедри експлуатації суднових енергетичних установок, Херсонська державна морська академія, Україна, vadim27101964@gmail.com.

PROCESSING OF INDICATOR DIAGRAM IN THE TASKS OF CONSTRUCTING DIGITAL PROFILES OF THE WORKING PROCESS OF SHIP ENGINES

M.Ie. Rybalchenko, E.V. Bilousov, A.P. Marchenko, V.P. Savchuk, V.P. Budko

During the operation of marine internal combustion engines, the procedure for indicating the working process in certain operating modes is widely used, followed by an analysis of indicator diagrams and a comparison of the results obtained with the reference ones obtained during engine factory tests. However, the general trend in the world fleet towards a decrease in the commercial speeds of ships, on the one hand, and the use of tight traffic schedules, on the other hand, have led to the fact that in most cases it is impossible to carry out indexing according to the procedures prescribed in the rules for the technical operation of engines. Thus, the ability of maintenance personnel to objectively assess the current technical condition of the engine is lost, and to determine the necessary list of preventive measures for maintenance and repair, which, of course, affects the efficiency of engines and the safety of navigation in general. One of the effective ways to solve this problem is the use of digital profiles of engine work processes, which characterize their work in the entire range of operating modes. With the help of a digital profile, it is possible to obtain a calculated reference indicator diagram, which can be used for comparison with the one obtained during the planned indication of the engine in any mode of its operation. As a basis for building digital profiles, it is appropriate to use the results of acceptance test bench tests of the engine by the manufacturer. However, taking into account the rather long service life of marine engines, test reports usually exist only in a raster format, which greatly complicates the processing of the indication results given in them, which, most often, was performed using mechanical indicators. To use this information to build digital profiles, the authors proposed a method for processing such indicator diagrams, described in previous articles. However, the efficiency of generating digital profiles significantly depends on the quality of the basic diagrams on which these profiles are built. This article is devoted to the processing of such diagrams.

Keywords: marine low-speed engines; indicator diagram; operating mode; monotonic approximation.