

ПАРАМЕТРИЧНА ДІАГНОСТИКА СУДНОВИХ ДИЗЕЛЬНИХ ДВИГУНІВ В РЕЖИМІ РЕАЛЬНОГО ЧАСУ

Р. А. Варбанець*, Д. С. Мінчев*, Ю. М. Кучеренко*, В. І. Залож**

*Одеський національний морський університет, **Дунайський інститут
Національного університету «Одеська морська академія» (Ізмаїл)

Анотація. Розглянуто параметри стабільності роботи суднового дизельного двигуна, які можуть бути розраховані в режимі реального часу за часовими діаграмами тиску та вібрації. Також розглянуто методи експрес-оцінки стабільності функціонування основних систем двигуна шляхом моніторингу та аналізу низки послідовних робочих циклів. Для оцінки нерівномірності роботи двигуна використовується дисперсійна оцінка відхилень основних параметрів. Для комплексної оцінки стабільності роботи двигуна в реальному часі запропоновано критерій СІІ (індекс циклової нерівномірності). Обґрунтовано критерії оцінки стабільності вібродіаграм впорскування палива та роботи газорозподільних клапанів, що використовують дисперсійний аналіз фронтів вібродіаграм. Викладені у роботі методи дозволять аналізувати нерівномірність робочих циклів, а також виконувати налаштування систем двигуна та контролювати результат під час експлуатації. Фіксуючи та опрацьовуючи сигнали тиску в циліндрі протягом декількох послідовних робочих циклів, система діагностики в реальному часі може виявляти та чисельно оцінювати відмінності у параметрах процесів на ділянках стиснення та згоряння. Режим реального часу також дозволяє проводити чисельний аналіз вібродіаграм на ділянках впорскування палива та закриття клапанів. Порівняльний аналіз вібросигналів на ділянках стиснення дає змогу виявляти та оцінювати нерівномірність роботи клапанного механізму. Аналогічно, порівняння вібродіаграм на ділянках згоряння палива дозволяє діагностувати нестабільність функціонування паливної апаратури високого тиску.

Ключові слова: діагностування суднових дизелів в реальному часі, параметри робочого процесу, вібродіагностика, індекс циклової нерівномірності, вібродіаграми впорскування палива, робота газорозподільних клапанів.

REAL-TIME PARAMETRIC DIAGNOSTICS OF MARINE DIESEL ENGINES

R. Varbanets*, D. Minchev*, Y. Kucherenko*, V. Zalozh**

*Odesa National Maritime University, **Danube Institute of National University
“Odesa Maritime Academy” (Izmail)

Abstract. Parameters of irregular engine operation are considered, which can be calculated in real time using time diagrams of pressure and vibration. Methods for expressly assessing the stability of the functioning of the main engine systems by monitoring and analyzing a number of successive operating cycles are considered. To assess the unevenness of engine operation, a dispersion estimate of deviations of the main parameters is used. For a comprehensive assessment of engine stability in real time, the CII (cycle's irregularity index) criterion is proposed. The assessment of fuel injection irregularity in the engine cylinder can be carried out by analyzing the phase fronts of the vibration signal of the injector. Coefficients for assessing the irregularity of fuel injection and gas distribution valves timing are also proposed, using dispersion analysis of vibrograms fronts. The data processing methods proposed in the article will make it possible to analyze the stability of operating cycles, as well as to perform optimal tuning of engine systems and

monitor the results during operation. By capturing and processing cylinder pressure signals over several consecutive operating cycles, the real-time diagnostic system can detect and numerically evaluate differences in process parameters during compression and combustion phases. Real-time mode also enables numerical analysis of vibration diagrams during fuel injection and valve closing periods. Comparative analysis of vibration signals during compression phases allows detection and evaluation of valve mechanism irregularities. Similarly, comparison of vibration diagrams during fuel combustion phases enables diagnostics of high-pressure fuel equipment operation instability.

Keywords: marine diesel real-time diagnostic, engine cycle parameters, vibration diagnostic, cycles irregularity index, injection and valves timing.

Вступ. Однією із основних задач систем діагностування суднових дизельних двигунів реального часу є оцінювання нерівномірності робочих циклів під час експлуатації двигуна в режимі реального часу. Так, при аналізі низки індикаторних діаграм одного циліндра можна передусім помітити коливання значень максимальних тисків P_{max} , а при детальнішому аналізі можна виявити зміни тисків наприкінці стиснення P_{comp} та середніх індикаторних тисків $IMEP$. Насправді, зміни від циклу до циклу відбуваються по всій кривій індикаторної діаграми $P(\varphi, ^\circ ПКВ)$ або $P(t, мс)$. Здебільшого, нерівномірність робочих циклів може бути спричинена роботою систем, що відповідають за якість згоряння палива у циліндрі: системою високого тиску подачі палива та системою керування газорозподільними клапанами.

Нерівномірність робочих циклів є досить небажаною особливістю суднових дизельних двигунів, оскільки вона спричиняє такі негативні наслідки:

- підвищення загального рівня вібрації двигуна;
- нерівномірний розподіл механічних навантажень на циліндри;
- перевантаження окремих циліндрів;
- і, як загальний наслідок перелічених причин, зниження ефективного ККД

та обмеження потужності двигуна [1–3].

Для того, щоб зменшити вібрацію двигуна, скоротити викиди шкідливих речовин, необхідно контролювати нерівномірність робочих циклів під час експлуатації двигуна. Нижче представлені запропоновані авторами критерії нерівномірності, які можуть бути отримані та проаналізовані під час експлуатації двигуна в режимі реального часу.

На відміну від інших параметрів двигуна ($IMEP$, $IPOWER$ та ін.), аналіз критеріїв нерівномірності може бути проведений у режимі «швидкого сканування» двигуна в реальному часі, оскільки для цього можна аналізувати часові діаграми тиску $P(t, мс)$. Можна сказати, що оцінка нерівномірності робочих циклів двигуна є головним завданням систем діагностики суднових дизельних двигунів у реальному часі.

Виклад основного матеріалу. Однією з головних причин нерівномірності циклів є нестабільність подачі палива, яка може бути спричинена циклічною нерівномірністю дози впорскуваного палива, кута випередження подачі палива

$\Delta\varphi$, а також тривалості впорскування $\Delta\varphi_{inj}$ (рис. 1).

У цьому випадку відбувається зміна основних параметрів робочого процесу, включно з середнім індикаторним тиском $IMEP$ та індикаторною потужністю $IPOWER$ на кожному циклі, що знижує ефективність експлуатації двигуна. Приблизно пропорційно відсотковій зміні циклової подачі палива змінюється індикаторна потужність циліндра, що підвищує рівень вібрації та знижує ефективний ККД двигуна.

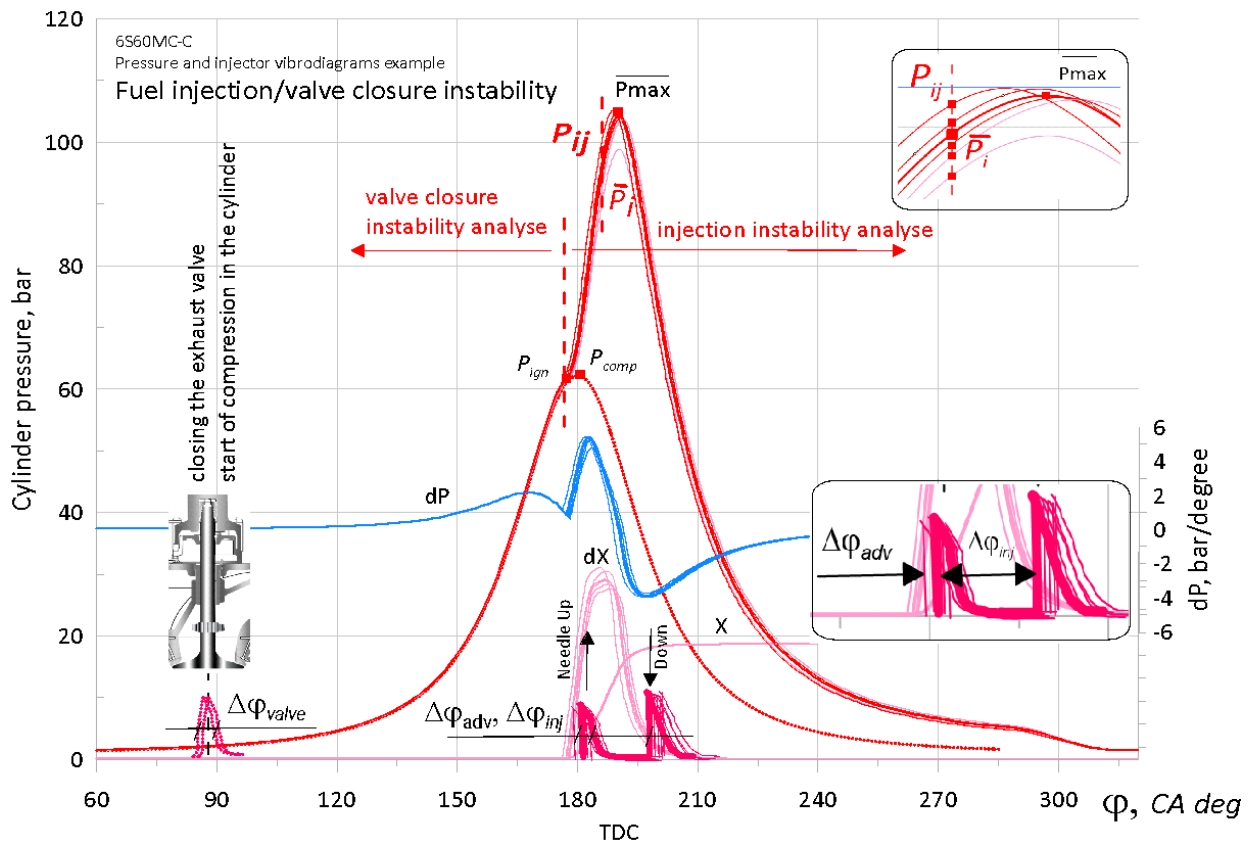


Рисунок 1 – Нестабільність робочих процесів малообертового двигуна S60MC-C на діаграмах тиску та вібродіаграмах

Записуючи та аналізуючи тиск у циліндрі на декількох послідовних робочих циклах, система реального часу може порівнювати відмінності параметрів на ділянках стиснення та згоряння і чисельно оцінювати ці відмінності. Аналіз вібродіаграм на ділянках впорскування палива і ділянках закриття клапанів також може бути проведений чисельно в режимі реального часу. Порівняльний аналіз вібродіаграм на ділянках стиснення дає змогу оцінити нерівномірність роботи клапанного механізму. Порівняльний аналіз на ділянках згоряння дає можливість оцінити нерівномірність роботи паливної апаратури високого тиску.

Оцінювання нерівномірності робочих циклів як діагностичного параметра має проводитися при постійному навантаженні двигуна. Якщо врахувати, що під час експлуатації суднових дизельних двигунів навантаження постійно змінюється через зовнішні умови, то для оцінки нерівномірності необхідно вибирати стабільні періоди експлуатації та враховувати постійну часу двигунів [4, 5].

Розглянемо деяку кількість m індикаторних діаграм робочих процесів ($j=1...m$), записаних при постійному навантаженні головного двигуна *S60MC-C*, рис. 1. Максимальний тиск на кожному j -му циклі $P_{max j}$ та максимальний середній тиск за m циклів $\overline{P_{max}}$ запишуться як:

$$P_{max j} = \max(P_{ij}); \quad \overline{P_{max}} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m P_{max ij}, \quad (1)$$

де $i = 1...N$ – кількість точок в одному циклі при записі індикаторної діаграми; m – кількість записаних циклів; j – індекс циклу.

На теперішній час в більшості сучасних систем діагностування морських дизельних двигунів використовується крок реєстрації діаграм тиску $\Delta P = 0,1$ °ПКВ для чотиритактних двигунів та $\Delta P = 0,05$ °ПКВ для малообертових двотактних двигунів. Такий незначний крок дозволяє ретельно аналізувати робочий процес та його нестабільність, забезпечуючи максимальний рівень деталізації, а також здійснювати оцінювання коефіцієнту детонації під час згоряння палива із застосуванням методів спектрального аналізу [6].

Для оцінювання нерівномірності робочих циклів використовуємо популярний критерій *COV* (коефіцієнт варіації) [7–9], який можна застосувати до всієї кривої тиску та отримати, таким чином, графік значень COV_{Pi} як оцінку нерівномірності роботи двигуна. Запишемо коефіцієнт варіації робочих циклів, виражений у відсотках, як відношення стандартного відхилення до поточного середнього значення обраної величини, у даному випадку – тиску:

$$COV_{Pi} = \frac{\sigma_{Pj}}{\overline{P_j}} * 100\% \quad (2)$$

де $\overline{P_j} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m P_{ij}$, а стандартне відхилення розраховується як:

$$\sigma_{Pj} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_i - \overline{P_j})^2 \quad (3)$$

У відомій літературі пропонується розраховувати та проаналізувати максимальне значення $COV_{P_{max}}$ [8]. На нашу думку, додатково до $COV_{P_{max}}$ можна проаналізувати також поточне (діаграма COV_{Pi}) та середнє значення $\overline{COV_{P_j}}$. Діаграма поточних значень COV_{Pi} покаже, на якій ділянці кривої тиску спостерігається найбільше відхилення робочих циклів, і залежно від цього можна зробити висновок про нестабільність впорскування палива або нестабільну роботу клапанів газорозподілу (рис. 2).

$$COV_{P_{max}} = \max(COV_{Pi}) \%; \quad (4)$$

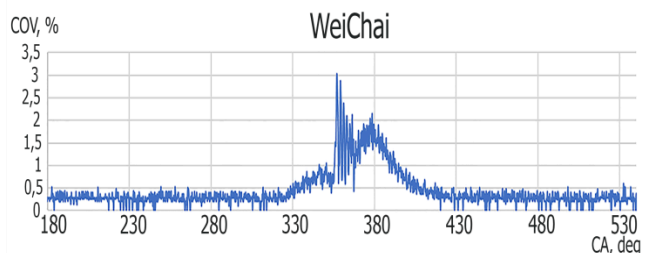
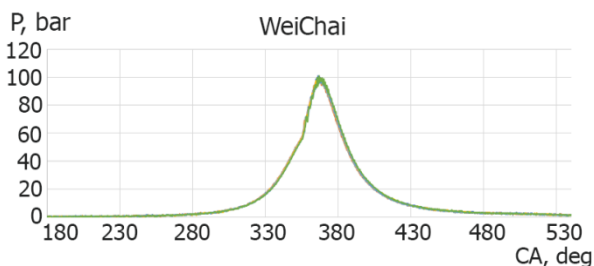
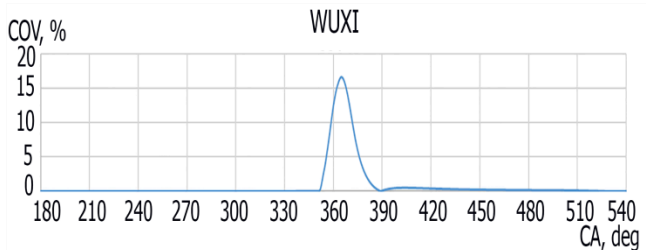
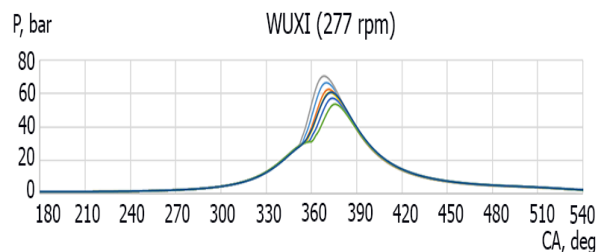
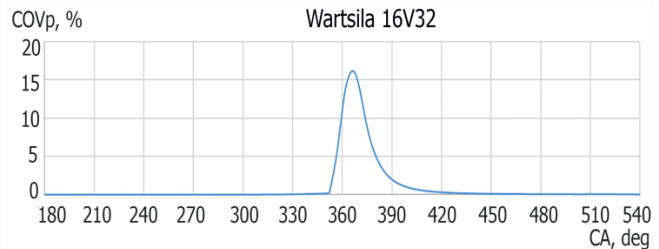
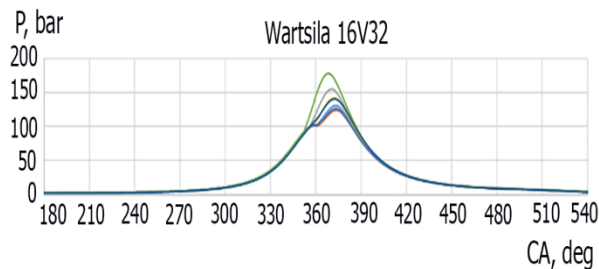
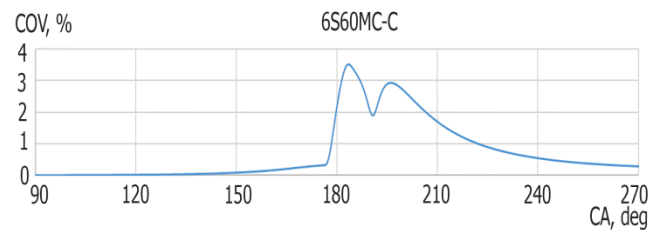
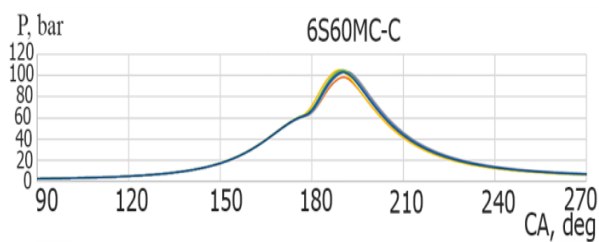
$$\overline{COV_{P_j}} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N COV_{P_i} \% \quad (5)$$

Можна сформулювати один комплексний критерій нестабільності робочих циклів за тиском CH_p (*cycles irregularity index*), який загалом характеризуватиме циклову нерівномірність двигуна:

$$CH_p = \sqrt{COV_{P_j} * COV_{P_{max}}} \% \quad (6)$$

Критерій CH_p виражається у відсотках і, як показує чисельний аналіз розрахункових та експериментальних даних (рис. 3), критерій CH_p є зручним засобом аналізу, що дозволяє загалом охарактеризувати циклову нерівномірність (*cycle-to-cycle variability*).

На рис. 2 та в табл. 1 наведено чисельний аналіз трьох зазначених критеріїв для кількох типів двигунів: малообертового двотактного *MAN S60MC-C*; чотиритактного суднового головного двигуна *WUXI*; чотиритактного суднового дизель-генератора *Wartsila 16V32* і лабораторних чотиритактних двигунів: *Deutz 226* (2021 року випуску) та *NVD24* (1970 року випуску).



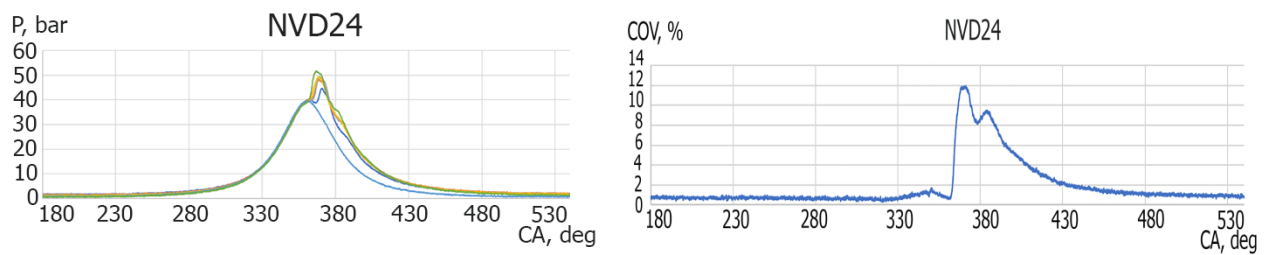


Рисунок 2 – Індикаторні діаграми та діаграми COV для п'яти типів двигунів

Таблиця 1 – Порівняння критеріїв COV та CII для п'яти типів двигунів

	6S60MC-C	Wärtsilä 16V32	WUXI	NVD	WeiChai
$\overline{COV}_{P_j} \%$	0,943	0,980	0,852	1,906	0,451
$CII_p \%$	1,822	3,977	3,759	4,778	1,168
$COV_{P_{max}} \%$	3,524	16,142	16,594	11,976	3,025

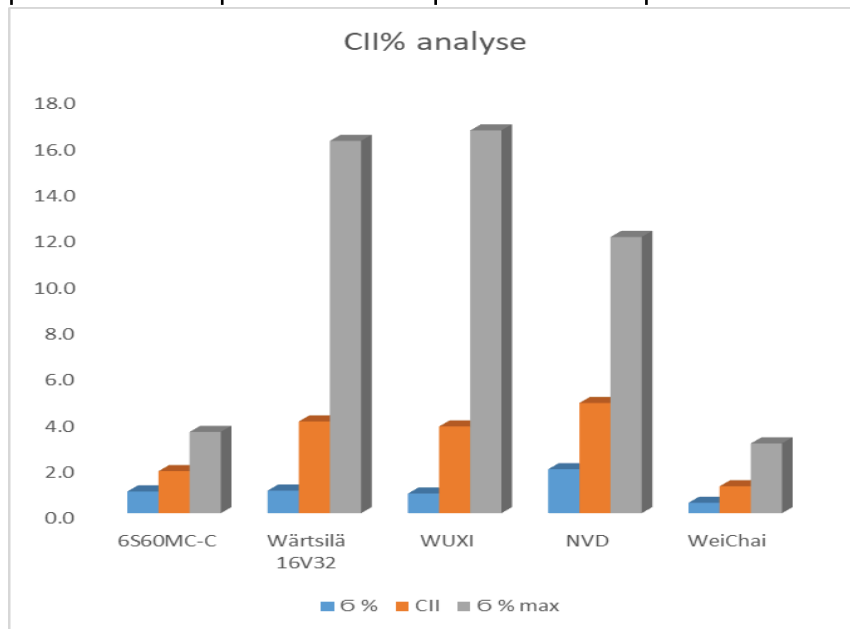


Рисунок 3 – Порівняння критеріїв CII (%) для п'яти типів двигунів

Аналіз показав значну циклову нерівномірність старого лабораторного двигуна *NVD24* і, як очікувалося, малу циклову нерівномірність нового двигуна *WeiChai* (*Deutz 226*). Під час аналізу робочих циклів *WeiChai* значення критеріїв

$COV_{P_{max}}$, $\overline{COV}_{P_j}$ та CII_p виявилися істотно меншими за відповідні значення

для інших двигунів. Спільний аналіз трьох критеріїв: $COV_{P_{max}}$, $\overline{COV}_{P_j}$ та CII_p

, показав, що узагальнений критерій CII_p є доброю загальною якісною оцінкою циклової нерівномірності (*cycle-to-cycle variability*), яку можна застосовувати в режимі реального часу з метою оцінки стабільності роботи двигуна під навантаженням (див. рис. 3).

Оцінку нестабільності впорскування палива в циліндр двигуна можна проводити шляхом аналізу фаз фронтів вібросигналу форсунки, див. рис. 1. Принцип отримання та аналізу вібродіаграм форсунок і газорозподільних клапанів показано в опублікованих джерелах [11–13]. Оскільки сигнал тиску і вібрації вимірюється паралельно, то після співставлення робочих циклів можна оцінити дисперсію розкиду фаз передніх фронтів вібродіаграми впорскування φ_{adv} та $\Delta\varphi_{inj}$ (див. рис. 1).

Якщо для оцінювання циклової нерівномірності (*cycle-to-cycle variability*) тиску в циліндрі застосовувалися критерії, виражені у відсотках, то для оцінки циклової нерівномірності впорскування палива та роботи газорозподільних клапанів необхідна абсолютна оцінка нерівномірності, виражена у кутових градусах повороту колінчастого вала (°ПКВ). У такому разі порівняння розкиду фаз впорскування палива в різних циліндрах буде цілком зрозумілим і логічним, наприклад: $\Delta\varphi_{inj} = 3,5$ °ПКВ – надмірно великий розкид, що свідчить про значну нестабільність, і $\Delta\varphi_{inj} = 0,3$ °ПКВ – малий розкид, що вказує на високу стабільність. Для оцінки циклової нерівномірності кута випередження впорскування палива в циліндр можна використовувати дисперсію відхилень передніх фронтів перших імпульсів вібродіаграм впорскування:

$$\Delta\varphi_{adv}, ^\circ CA \cong \sigma_{\varphi_{adv}} = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{j=1}^m (\varphi_{adv j} - \overline{\varphi_{adv j}})^2} \quad (7)$$

Для оцінки циклової нерівномірності тривалості впорскування палива в циліндр використовуємо дисперсію відхилень різниці передніх фронтів імпульсів вібродіаграм впорскування:

$$\Delta\varphi_{inj}, ^\circ CA \cong \sigma_{\varphi_{inj}} = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{j=1}^m (\varphi_{inj j} - \overline{\varphi_{inj j}})^2} \quad (8)$$

Для оцінки циклової нерівномірності кутів закриття клапанів [8] використовуємо дисперсію відхилень фаз максимумів віброімпульсів клапанів на вібродіаграмах впорскування:

$$\Delta\varphi_{valve}, ^\circ CA \cong \sigma_{\varphi_{valve}} = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{j=1}^m (\varphi_{valve j} - \overline{\varphi_{valve j}})^2} \quad (9)$$

Для різних моделей двигунів можуть бути встановлені кольорові (зелені, жовті, червоні) межі допустимих нормальних та підвищених значень циклової нерівномірності оцінюваних параметрів. Так, наприклад, для оцінки циклової нерівномірності кута випередження впорскування палива для двигуна *S60MC-C* в експлуатації можна умовно встановити такі межі (рис. 4). Візуальний контроль критеріїв циклової нерівномірності (*cycle-to-cycle variability*) буде зручним в експлуатації, і він може здійснюватися в реальному часі за допомогою аналізу часових діаграм до вирішення задачі синхронізації даних.

$\Delta\varphi_{adv} \cong \sigma_{\varphi_{adv}}$	< 0.5 °CA	0.6 ÷ 2.5 °CA	> 2.6 °CA
--	-----------	---------------	-----------

Рисунок 4 – Візуальний контроль критерію циклової нерівномірності кута випередження впорскування палива для двигуна *S60MC-C*

Висновки. Діагностика суднових двигунів у реальному часі має низку переваг, оскільки дає можливість аналізувати поточний стан циліндро-поршневої групи, паливної апаратури високого тиску та механізму газорозподілу безпосередньо під час експлуатації. Система діагностики в реальному часі дозволить виконувати оптимальне налаштування відповідних механізмів і контролювати результат їх налаштування під час експлуатації.

В режимі реального часу можлива оцінка критеріїв циклової нерівномірності (*cycle-to-cycle variability*): COV_i , $\overline{COV_j}$, σ_ϕ та CI_p які можуть бути розраховані за часовими діаграмами до вирішення задачі синхронізації даних (до перетворення даних тиску газів в циліндрі з функцій часу у функції від кута повороту колінчастого валу).

Для комплексної оцінки стабільності роботи двигуна в реальному часі запропоновано критерій CI_p , % (індекс циклової нерівномірності). Запропоновано критерії оцінки стабільності вібродіаграм впорскування палива та роботи газорозподільних клапанів, що використовують дисперсійний аналіз фронтів вібродіаграм. Для оцінки нерівномірності індикаторних діаграм тиску використовуються критерії, виражені у відсотках. Для оцінки нерівномірності системи впорскування та системи керування газорозподільними клапанами використовуються критерії, виражені у градусах повороту колінчастого валу.

Завдяки можливості проводити аналіз нерівномірності робочих циклів, системи діагностики двигунів у режимі реального часу мають вагомні переваги порівняно з наразі поширеними в морській галузі системами відкладеного діагностичного аналізу.

ЛІТЕРАТУРА

1. Schmiller K., Wolschendorf J. Cycle-to-cycle variations of combustion noise in diesel engines. *SAE Transactions*. 1989. Vol. 98, Section 3. P. 60–70. URL: <http://www.jstor.org/stable/44580924> (дата звернення: 03.01.2025).
2. Neumann S. High temperature pressure sensor based on thin film strain gauges on stainless steel for continuous cylinder pressure control. *CIMAC Congress*, Hamburg Digest. 2001. P. 1–12.
3. Neumann S., Varbanets R., Kyrylash O., Yeryganov O., Maulevych V. Marine diesels working cycle monitoring on the base of IMES GmbH pressure sensors data. *Diagnostyka*. 2019. Vol. 20, № 2. P. 19–26. URL: <https://doi.org/10.29354/diag/104516>.
4. Heywood J. B. Internal combustion engine fundamentals. New York : McGraw-Hill, 1988. 930 p.
5. Orobey V., Nemchuk O., Lymarenko O., Pitera V., Lohinova L. Taking account of the shift and inertia of rotation in problems of diagnostics of the spectra of critical forces mechanical systems. *Diagnostyka*. 2021. Vol. 22, № 1. P. 39–44. URL: <https://doi.org/10.29354/diag/132555>.
6. Varbanets R., Fomin O., Pištěk V., Klymenko V., Minchev D., Khrulev A., Zalozh V., Kučera P. Acoustic Method for Estimation of Marine Low-Speed Engine Turbocharger Parameters. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2021. Vol. 9, № 3. P. 321. URL: <http://dx.doi.org/10.3390/jmse9030321>.

7. Wang Y., Xiao F., Zhao Y., Li D., Lei X. Study on cycle-by-cycle variations in a diesel engine with dimethyl ether as port premixing fuel. *Applied Energy*. 2015. Vol. 143. P. 58–70. URL: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.12.079>.
8. Shi J., Wang T., Zhao Z., Wu Z., Zhang Z. Cycle-to-Cycle Variation of a Diesel Engine Fueled with Fischer–Tropsch Fuel Synthesized from Coal. *Applied Sciences*. 2019. Vol. 9, № 10. P. 2032. URL: <https://doi.org/10.3390/app9102032>.
9. Maurya R. K., Agarwal A. K. Statistical analysis of the cyclic variations of heat release parameters in HCCI combustion of methanol and gasoline. *Applied Energy*. 2012. Vol. 89, № 1. P. 228–236. URL: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.07.002>.
10. Himmelblau D. M. Applied nonlinear programming. New York : McGraw-Hill, 2018. 498 p.
11. Варбанець Р. А. Діагностичний контроль робочого процесу суднових дизелів в експлуатації : дис. ... д-ра техн. наук : 05.05.03. Одеса, 2010. 314 с.
12. Minchev D., Varbanets R., Zalozh V., Ahieiev M., Psariuk S. Improvement of the fuel combustion model in a digital twin application for diesel engines. *Transport Development*. 2023. Vol. 4, № 19. P. 108–124. URL: <https://doi.org/10.33082/td.2023.4-19.09>.
13. Minchev D., Varbanets R., Aleksandrovska N., Pisintsaly L. Marine diesel engines operating cycle simulation for diagnostics issues. *Acta Polytechnica*. 2021. Vol. 61, № 3. P. 428–440. URL: <http://dx.doi.org/10.14311/AP.2021.61.0435>.

Варбанець Роман Анатолійович – д.т.н., професор, завідувач кафедри суднових енергетичних установок та технічної експлуатації, Одеський національний морський університет, roman.varbanets@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-6730-0380>.

Мінчев Дмитро Степанович – д.т.н., професор, професор кафедри суднових енергетичних установок та технічної експлуатації, Одеський національний морський університет, misaidima@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-5960-3063>.

Кучеренко Юрій Миколайович – к.т.н., доцент кафедри суднових енергетичних установок та технічної експлуатації, Одеський національний морський університет, kucherenko.iurii@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-1568-165X>.

Залож Віталій Іванович – к.т.н., доцент кафедри інженерних дисциплін, Дунайський інститут Національного університету «Одеська морська академія», м. Ізмаїл, zalozh@dinuoma.com.ua, <https://orcid.org/0000-0002-5213-6896>.