

Залож В.І., Варбанець Р.А., Мінчев Д.С.

АНАЛІЗ ЦИКЛОВОЇ НЕРІВНОМІРНОСТІ ДЛЯ СУДНОВИХ ДИЗЕЛЬНИХ ДВИГУНІВ В РЕЖИМІ РЕАЛЬНОГО ЧАСУ

У дослідженні представлено методологію оцінки рівномірності роботи суднового дизельного двигуна на основі аналізу параметрів, що розраховуються в режимі реального часу за часовими діаграмами тиску та вібродіаграмами впорскування палива і закриття клапанів. Запропоновано методи експрес-діагностики основних систем двигуна шляхом аналізу серії послідовних робочих циклів. Представлено новий комплексний показник – індекс циклової нерівномірності що забезпечує інтегральну оцінку рівномірності роботи двигуна в режимі реального часу. Для кількісного визначення нерівномірності застосовано дисперсійний аналіз відхилень основних параметрів робочого процесу. Запропоновано критерії оцінки рівномірності процесу впорскування палива та роботи газорозподільного механізму на основі дисперсійного аналізу фронтів вібросигналів. Розроблена методика дозволяє не лише діагностувати нерівномірність робочих циклів, але й оптимізувати налаштування систем двигуна з контролем результатів безпосередньо під час експлуатації. Система діагностики в режимі реального часу забезпечує реєстрацію та обробку сигналів тиску в циліндрі протягом послідовності робочих циклів, що дозволяє виявляти та кількісно оцінювати відмінності параметрів на етапах стиснення та згоряння. Паралельно проводиться числовий аналіз вібродіаграм на ділянках впорскування палива та закриття клапанів. Порівняльний аналіз вібросигналів на етапі стиснення дозволяє виявляти порушення в роботі клапанного механізму, тоді як дослідження вібродіаграм на ділянці згоряння забезпечує діагностику нестабільності функціонування паливної апаратури високого тиску. Практична цінність роботи полягає у створенні комплексної методології оперативної діагностики технічного стану суднового дизельного двигуна, що дозволяє виявляти відхилення в роботі основних систем та своєчасно вживати необхідних коригувальних заходів.

Ключові слова: індекс циклової нерівномірності, дизельний двигун, згоряння палива, робочий процес, діагностика, механізм газорозподілу.

Постановка проблеми. Сучасні суднові дизельні двигуни являють собою складні технічні системи, ефективність роботи яких безпосередньо впливає на експлуатаційні та економічні показники морського транспорту. Одним із ключових викликів в експлуатації цих агрегатів є забезпечення рівномірності робочих циклів, що суттєво впливає на ефективний ККД та потужність силової установки. Так, при дослідженні серії індикаторних діаграм одного циліндра виявляються коливання максимальних тисків згоряння P_{max} , а детальніший аналіз демонструє зміни тисків наприкінці стиснення P_{comp} та варіації середнього індикаторного тиску $IMEP$. Дослідження показують, що циклової зміни не обмежуються окремими точками максимального тиску згоряння чи кінця стиснення, а проявляються вздовж усієї кривої індикаторної діаграми. Така нерівномірність робочого процесу переважно виникає через функціонування двох критично важливих систем двигуна, що відповідають за якість згоряння палива у циліндрі: системою високого тиску подачі палива та системою керування газорозподільними клапанами.

Проблема нерівномірності робочих циклів набуває особливої актуальності в контексті зростаючих вимог до екологічності та енергоефективності морського транспорту. Існуючі системи моніторингу та діагностики робочого процесу дизельних двигунів не забезпечують комплексного підходу до оцінювання варіативності індикаторних діаграм у режимі реального часу, що ускладнює своєчасне виявлення та попередження відхилень у роботі двигуна.

Відсутність ефективних методів оперативної діагностики циклової нерівномірності призводить до зниження ефективного ККД двигуна, збільшення механічних навантажень на його компоненти та підвищення рівня шкідливих викидів. Особливо гостро ця проблема проявляється при роботі двигуна на перехідних режимах та в умовах змінного навантаження, характерних для морської експлуатації.

Існуючі методики оцінювання параметрів робочих циклів зазвичай базуються на аналізі середнього індикаторного тиску та інших усереднених показників, що не дозволяє виявити короточасні відхилення максимальних тисків та локальні нестабільності в роботі окремих циліндрів. Це створює потребу в розробці нових підходів до діагностування, які б забезпечували можливість детального аналізу часових діаграм тиску в режимі реального часу.

Таким чином, актуальним завданням є розробка методів та засобів діагностики нерівномірності робочих циклів судових дизельних двигунів, які дозволять підвищити ефективність їх експлуатації та забезпечити своєчасне виявлення порушень у роботі систем високого тиску подачі палива та керування газорозподільними клапанами.

Зазначені обставини визначають необхідність проведення досліджень, спрямованих на вдосконалення систем діагностування судових дизельних двигунів та розробку нових критеріїв оцінювання нерівномірності робочих циклів в режимі «швидкого сканування».

Метою роботи є розробка критеріїв оцінювання циклової нерівномірності роботи судового дизельного двигуна в режимі реального часу на основі аналізу діаграм тиску в циліндрі та вібродіаграм систем паливоподачі й газорозподілу.

Аналіз існуючих досліджень і публікацій. Проблема нерівномірності робочих циклів дизельних двигунів знаходиться в центрі уваги багатьох дослідників. Аналіз публікацій за останні роки дозволяє виділити основні напрямки досліджень.

Проблема циклічної нерівномірності робочого процесу дизельних двигунів привертає увагу багатьох дослідників. Фундаментальні положення щодо причин виникнення та особливостей прояву нерівномірності робочих циклів викладені в роботі *Heywood J.B.* [1], де автор систематизував основні фактори, що впливають на стабільність робочого процесу.

Longwic R., Sen A.K. та ін. [2] дослідили вплив різних видів палива на характер циклічних коливань. Використовуючи аналіз, автори виявили, що для альтернативних палив характерні стійкі довгоперіодичні коливання, тоді як при роботі на звичайному дизельному паливі такі коливання спостерігаються лише при високих обертах.

Особливості прояву циклічної нерівномірності при роботі на дизельно-етанольних сумішах досліджені *Gürgen S., Ünver B., Altın İ.* [3]. Встановлено, що додавання етанолу призводить до підвищення коефіцієнта варіації середнього індикаторного тиску COV_{imep} .

Вплив альтернативних палив на циклову нерівномірність детально досліджено в роботі *Shi J., Wang T.* та ін. [5]. Автори експериментально довели, що використання синтетичного палива з підвищеним цетановим числом забезпечує зниження циклової нерівномірності на 15..20% порівняно зі звичайним дизельним паливом. В роботі [6] автори *Wang X., Zhao H.* провели моделювання циклової нерівномірності для гібридного двигуна внутрішнього згоряння з іскровим запалюванням та контрольованим самозайманням.

Wagner R., Edwards K., Daw C.S. [7] запропонували методологію контролю циклової нерівномірності в одноциліндровому бензиновому двигуні зі стехіометричним паливом. Розвиток цього напрямку представлений в роботі *Hunicz J.* [4], де досліджено вплив періоду перекриття клапанів на стабільність робочого процесу.

Методи діагностування циклової нерівномірності розвинуті в роботах *Sen A.K., Litak G.* [8] та *Maurya R.K., Agarwal A.K.* [9]. Авторами запропоновано використання різних методів обробки даних для виявлення характерних особливостей циклових коливань.

Значний внесок у розуміння механізмів циклової нерівномірності внесли дослідження *Koizumi I., Gyakushi N., Takamoto Y.* [10], які встановили, що варіації тиску в циліндрі пов'язані зі

збільшенням періоду затримки займання при холодному пуску двигуна. Zhong L. та ін. [11] спостерігали циклові коливання в паливній системі дизельних двигунів.

Аналіз публікацій показує, що незважаючи на значний обсяг досліджень, проблема діагностування нерівномірності робочих циклів в режимі реального часу залишається актуальною і потребує подальшого вивчення. Особливу увагу слід приділити розробці ефективних методів оцінювання рівномірності роботи двигуна на основі аналізу індикаторних діаграм.

Викладення основного матеріалу.

Нерівномірність робочих циклів значною мірою обумовлена коливаннями в системі подачі палива. Ці коливання проявляються через варіації об'єму впорскнутого палива в кожному циклі, кута випередження подачі палива φ_{adv} , а також змінну тривалість самого процесу впорскування $\Delta\varphi_{inj}$. Подібні коливання призводять до змін ключових робочих параметрів двигуна в кожному циклі. Зокрема, спостерігаються відхилення середнього індикаторного тиску $IMEP$ та індикаторної потужності $IPOWER$, що негативно впливає на експлуатаційні характеристики. При цьому зміни індикаторної потужності циліндра майже прямо пропорційні відсотковому відхиленню циклової подачі палива. В результаті це призводить до посилення вібраційного навантаження та зниження ефективного ККД двигуна.

Вимірювання та аналіз тиску в циліндрі впродовж послідовних робочих циклів дозволяє проводити порівняльну оцінку параметрів на ділянках стиснення та згоряння з подальшою кількісною оцінкою виявлених відхилень.

Аналіз вібродіаграм на ділянках впорскування палива і ділянках закриття клапанів також може бути проведений чисельно. Зіставлення вібродіаграм на етапі стиснення дозволяє визначити ступінь нерівномірності функціонування клапанного механізму. Аналогічне порівняння на етапі згоряння забезпечує оцінку стабільності роботи компонентів паливної апаратури високого тиску.

Діагностування технічного стану двигуна за показником нерівномірності робочих циклів потребує забезпечення сталого навантажувального режиму. Особливість експлуатації суднових дизельних установок полягає у постійній зміні навантаження під впливом зовнішніх факторів. Тому для достовірної оцінки нерівномірності необхідно виділяти інтервали рівномірної роботи з урахуванням інерційності двигуна.

Для аналізу візьмемо серію з m індикаторних діаграм ($j=1..m$), отриманих за умови сталого навантаження головного двигуна $S60MC-C$, див. рис. 1. Максимальний тиск для j -го циклу P_{maxj} та усереднений максимальний тиск за всі m циклів $\overline{P_{max}}$ визначаються як:

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

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

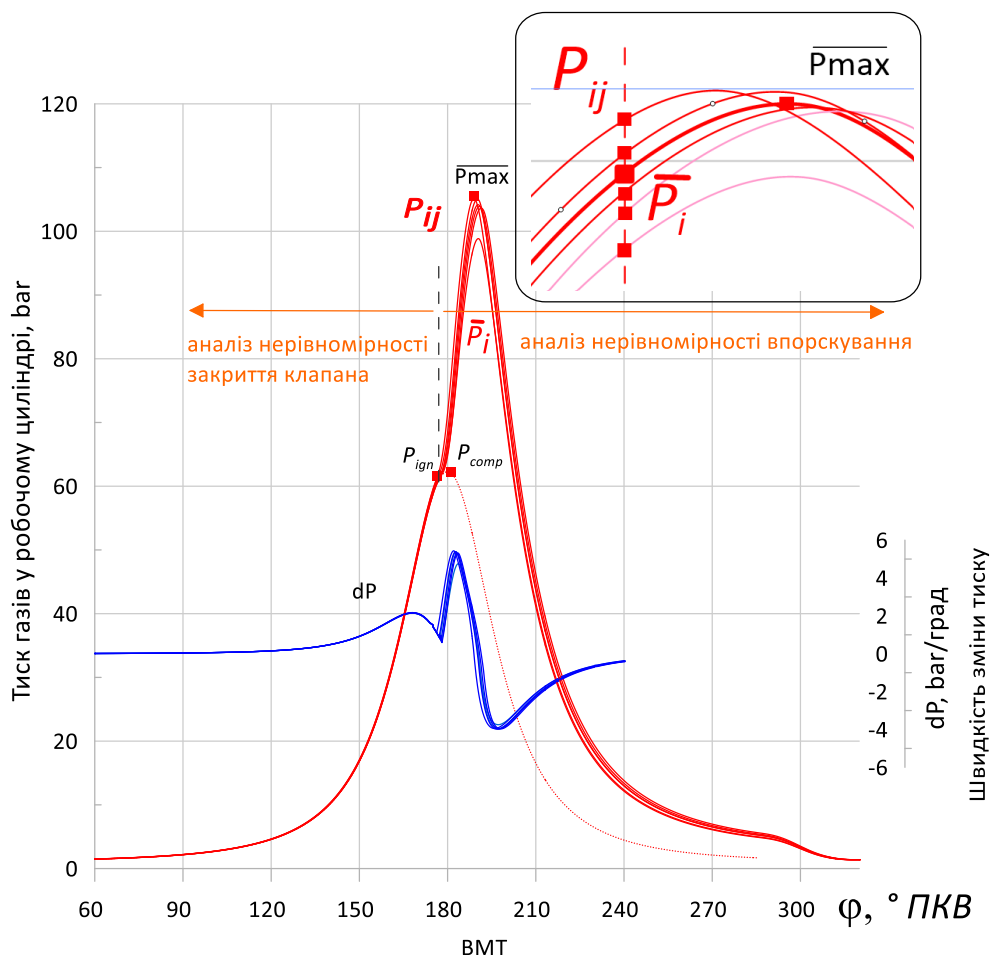


Рисунок 1. Нерівномірність робочих процесів малообертового двигуна S60MC-C на діаграмах тиску

При аналізі нерівномірності робочих циклів застосовується широко визнаний критерій COV – коефіцієнт варіації [8, 12]. Даний критерій дозволяє здійснити оцінку по всій індикаторній діаграмі, формуючи графік значень COV_{P_i} , як оцінку нерівномірності роботи двигуна. Математично коефіцієнт варіації робочих циклів визначається як відсоткове відношення стандартного відхилення до усередненого значення тиску:

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

Традиційний підхід, описаний в літературі [5], базується на аналізі максимальних значень коефіцієнта варіації $COV_{P_{max}}$. Проте, на нашу думку, комплексний аналіз доцільно розширити дослідженням як поточних значень (що відображається діаграмою COV_{P_i}), так і середніх показників $\overline{COV_{P_j}}$. Діаграма поточних значень COV_{P_i} дозволяє локалізувати ділянки з найбільшими відхиленнями робочих циклів. На основі розташування цих ділянок можна визначити джерело нестабільності – чи то система впорскування палива, чи механізм газорозподілу.

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

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

Для всебічної оцінки циклової нерівномірності двигуна пропонується використання єдиного комплексного показника – індекса нерівномірності робочих циклів за тиском (*cycles irregularity index, CII_p*). Цей критерій забезпечує узагальнену характеристику циклової нерівномірності роботи двигуна:

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

Індекс нерівномірності CII_p представляється у відсотковому вираженні. За результатами порівняльного аналізу теоретичних розрахунків та експериментальних досліджень (див. рис. 2), цей критерій демонструє свою практичну цінність як ефективний інструмент для інтегральної оцінки міжциклової нерівномірності (*cycle-to-cycle variability*).

Порівняльний аналіз трьох діагностичних критеріїв представлено на рис. 3 та в табл. 1. Дослідження охоплює різні типи 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).

Таблиця 1. Порівняння критеріїв COV та CII_p 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

Результати досліджень виявили суттєві відмінності в показниках циклової нерівномірності досліджуваних двигунів. Зокрема, встановлено високий рівень нерівномірності для лабораторного двигуна NVD24 з тривалим терміном експлуатації. Натомість новий двигун WeiChai (Deutz 226) продемонстрував очікувано низькі показники нерівномірності робочих циклів. При цьому всі три критерії оцінки ($COV_{P_{max}}$, $\overline{COV_{P_j}}$ та CII_p) для двигуна WeiChai показали значно нижчі значення порівняно з іншими двигунами.

Комплексна оцінка трьох діагностичних критеріїв ($COV_{P_{max}}$, $\overline{COV_{P_j}}$ та CII_p) підтвердила ефективність узагальненого показника CII_p як інтегральної характеристики міжциклової нерівномірності (*cycle-to-cycle variability*). Цей показник забезпечує достовірну якісну оцінку рівномірності роботи двигуна під навантаженням та може використовуватися для оперативної діагностики, див. рис. 2.

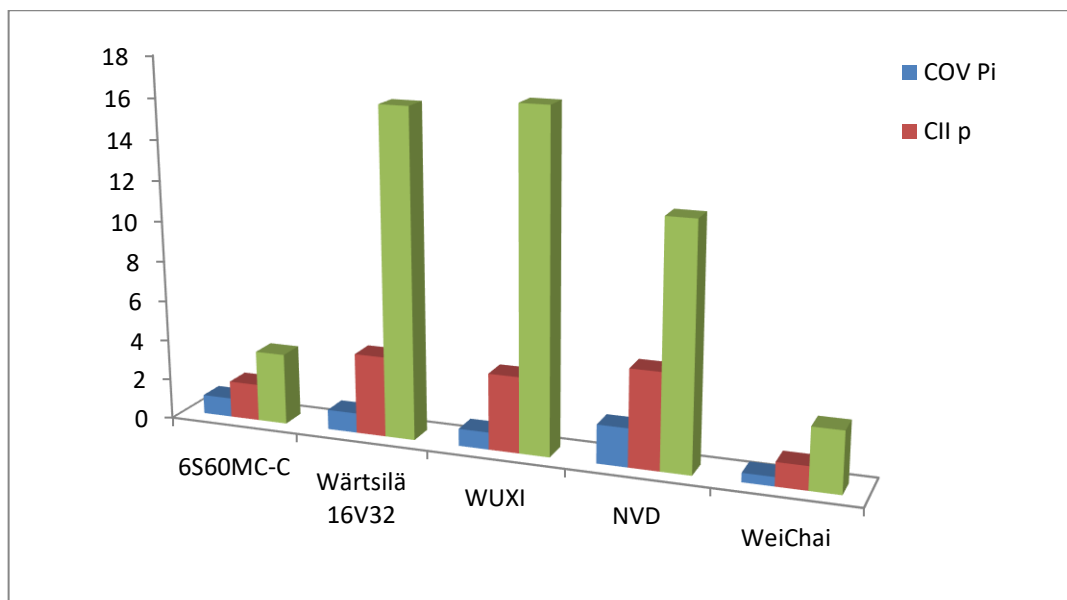


Рисунок 2 – Порівняння критеріїв $COV_{P_{max}}$, $\overline{COV_{P_j}}$ та CII_p (%) для п'яти типів двигунів

Оцінка нерівномірності впорскування палива в циліндр. Аналіз нестабільності процесу впорскування палива в циліндр здійснюється через дослідження фазових характеристик фронтів вібросигналу форсунки. Методологія реєстрації та обробки вібродіаграм форсунок та клапанів газорозподільного механізму детально висвітлена в роботах [13-16].

Одноточасна реєстрація сигналів тиску та вібрації з подальшим зіставленням робочих циклів дозволяє визначити дисперсію фазових характеристик – кута випередження впорскування φ_{adv} та тривалості впорскування $\Delta\varphi_{inj}$, див. рис. 3.

На відміну від оцінки міжциклової нерівномірності (*cycle-to-cycle variability*) тиску в циліндрі, де використовуються відносні критерії у відсотках, аналіз нерівномірності впорскування палива та роботи механізму газорозподілу потребує абсолютних значень. Такі відхилення вимірюються в кутових градусах повороту колінчастого вала (°ПКВ).

Використання абсолютних значень забезпечує чітку інтерпретацію відхилень фаз впорскування палива між циліндрами. Наприклад, розкид тривалості впорскування $\Delta\varphi_{inj} = 3,5$ °ПКВ свідчить про критичну нестабільність процесу, тоді як значення $\Delta\varphi_{inj} = 0,3$ °ПКВ вказує на його високу стабільність. Для характеристики циклової нерівномірності кута випередження впорскування застосовується дисперсія відхилень передніх фронтів початкових імпульсів на вібродіаграмах впорскування:

$$\Delta\varphi_{adv} = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{j=1}^m (\varphi_{advj} - \overline{\varphi_{advj}})^2} \quad (7)$$

де m – деяка кількість вібродіаграм ($j=1..m$), φ_{advj} – значення кута випередження впорскування в j -тому циклі, $\overline{\varphi_{advj}}$ – середнє значення кута випередження впорскування.

Аналогічно і для тривалості впорскування палива в циліндр. Циклова нерівномірність тривалості впорскування палива визначається через дисперсію відхилень часових інтервалів між передніми фронтами імпульсів на вібродіаграмах процесу впорскування:

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

де $\varphi_{inj\ j}$ – тривалість впорскування в j -тому циклі, $\overline{\varphi_{inj\ j}}$ – середня тривалість впорскування.

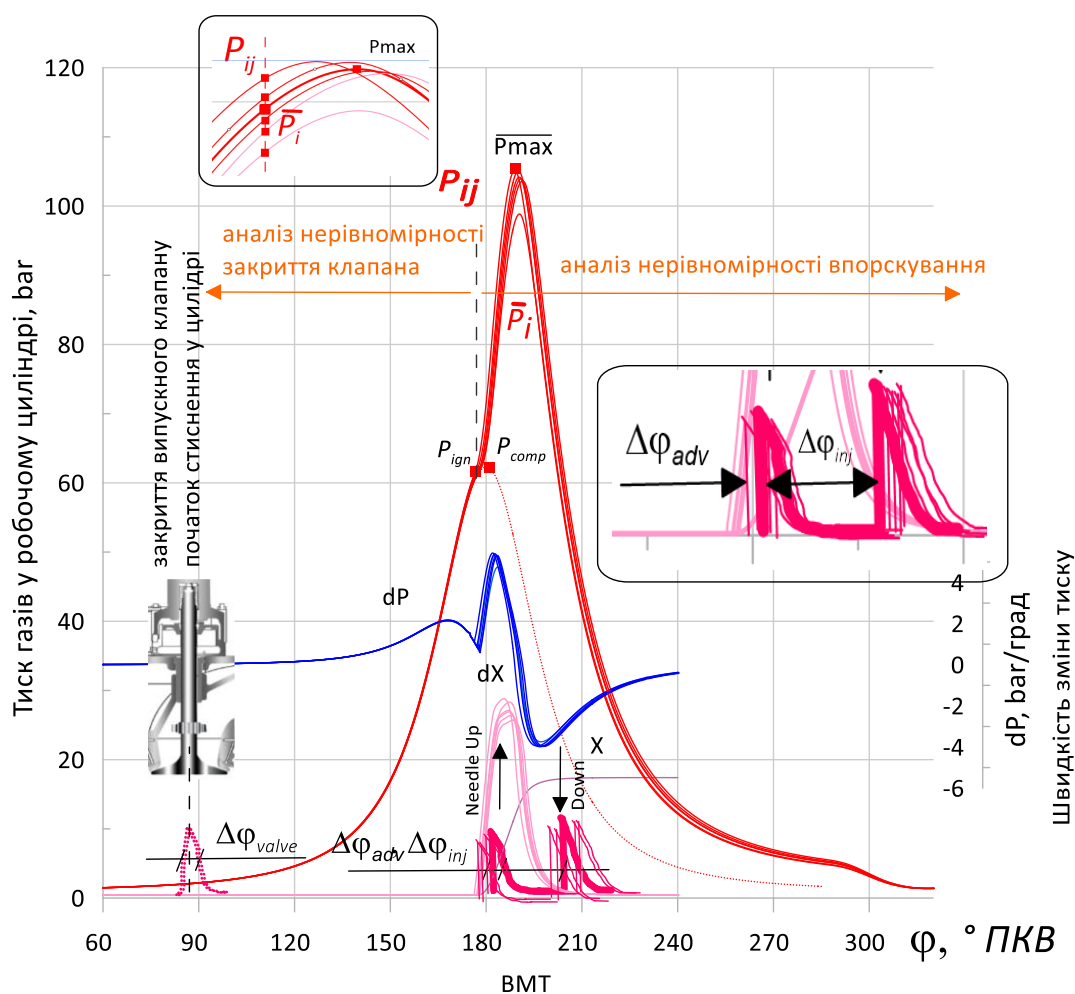


Рисунок 3 – Нестабільність робочих процесів малообертового двигуна S60MC-C на діаграмах тиску та вібродіаграмах

Для визначення циклової нерівномірності кутів закриття клапанів застосовується дисперсія відхилень фаз максимумів віброімпульсів клапанів на вібродіаграмах впорскування [5]:

$$\Delta\varphi_{valve} = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{j=1}^m (\varphi_{valvej} - \overline{\varphi_{valvej}})^2} \quad (9)$$

де φ_{valvej} – кут закриття клапана в j -тому циклі, $\overline{\varphi_{valvej}}$ – середнє значення кута закриття клапана. Всі кутові величини вимірюються в градусах повороту колінчастого вала (°ПКВ).

В процесі експлуатації різних моделей двигунів доцільно використовувати систему граничних значень циклової нерівномірності з кольоровим маркуванням (зелений, жовтий, червоний діапазони). Приклад такої системи для двигуна S60MC-C наведено на рис. 4, де встановлено граничні значення нерівномірності кута випередження впорскування палива.

$\Delta\varphi_{adv}$

< 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

Графічне представлення критеріїв міжциклової нерівномірності (*cycle-to-cycle variability*) у реальному часі забезпечує зручність експлуатаційного контролю на етапі до вирішення завдання синхронізації даних.

Висновки. Розрахунок критеріїв циклової нерівномірності (*cycle-to-cycle variability*) можливий у режимі реального часу шляхом аналізу часових діаграм до етапу синхронізації даних (тобто до перетворення даних тиску в циліндрі з функції часу у функцію кута повороту колінчастого вала). Режим діагностики суднових двигунів у реальному часі надає суттєві переваги, забезпечуючи можливість безперервного аналізу функціонування циліндро-поршневої групи, паливної апаратури високого тиску та механізму газорозподілу безпосередньо в експлуатаційних умовах. Такий підхід дозволяє здійснювати точне регулювання вказаних механізмів та верифікувати ефективність налаштувань під час роботи двигуна.

Для всебічної оцінки стабільності роботи двигуна у режимі реального часу запропоновано критерій циклової нерівномірності (CII_p , %), що виступає як комплексний діагностичний критерій. Нерівномірність роботи паливної апаратури та механізму газорозподілу оцінюється за допомогою критеріїв, що базуються на дисперсійному аналізі фронтів вібродіаграм.

Здатність проводити безперервний аналіз циклової нерівномірності надає принципово нові діагностичні можливості порівняно з поширеними в морській галузі системами відкладеного діагностичного аналізу. Такий підхід забезпечує негайне виявлення відхилень у роботі двигуна та дозволяє оперативно вживати необхідних коригувальних заходів, що суттєво підвищує надійність експлуатації суднових енергетичних установок.

REFERENCES

1. Heywood, J. B. (1988). *Internal Combustion Engine Fundamentals*. McGraw-Hill Education.
2. Longwic, R., Sen, A. K., Górski, K., Lotko, W., & Litak, G. (2011). Cycle-to-cycle variation of the combustion process in a diesel engine powered by different fuels. *Journal of Vibroengineering*, 13(1), 120-127. URL: <https://www.extrica.com/article/10448>.
3. Gürgen, S., Ünver, B., & Altın, İ. (2016). Experimental Investigation of Cyclic Variations in Diesel Engine Using Ethanol-Diesel Fuel Blends. In *Proceedings of The Second Global Conference on Innovation in Marine Technology and the Future of Maritime Transportation*, 729-734.
4. Hunicz, J. (2014). On Cyclic Variability in a Residual Affected HCCI Engine with Direct Gasoline Injection during Negative Valve Overlap. *Mathematical Problems in Engineering*, Article ID 359230, 1-11. DOI: <https://doi.org/10.1155/2014/359230>.
5. Shi, J., Wang, T., Zhao, Z., Wu, Z., & Zhang, Z. (2019). Cycle-to-Cycle Variation of a Diesel Engine Fueled with Fischer-Tropsch Fuel Synthesized from Coal. *Applied Sciences*, 9, 2032-2045. DOI: <https://doi.org/10.3390/app9102032>.
6. Wang, X., & Zhao, H. (2022). Modelling Study of Cycle-To-Cycle Variations (CCV) in Spark Ignition (SI)-Controlled Auto-Ignition (CAI) Hybrid Combustion Engine by Using Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS) and Large Eddy Simulation (LES). *Energies*, 15(12), 4478. DOI: <https://doi.org/10.3390/en15124478>.
7. Wagner, R., Edwards, K., & Daw, C. S. (2006). On the Nature of Cyclic Dispersion in Spark Assisted HCCI Combustion (SAE Technical Paper No. 2006-01-0418). SAE International. DOI: <https://doi.org/10.4271/2006-01-0418>.
8. Sen, A. K., Litak, G., Taccani, R., & Radu, R. (2008). Wavelet analysis of cycle-to-cycle pressure variations in an internal combustion engine. *Chaos, Solitons & Fractals*, 38(3), 886-893. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2007.01.041>.

9. Maurya, R. K., & Agarwal, A. K. (2013). Experimental investigation of cyclic variations in HCCI combustion parameters for gasoline like fuels. *Applied Energy*, 111, 310-323. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.07.002>.
10. Koizumi, I., Gyakushi, N., & Takamoto, Y. (1977). Study on the cycle-by-cycle variation in diesel engines. *Bulletin of JSME*, 20, 1-7. DOI: <https://doi.org/10.1299/jsme1958.20.869>.
11. Zhong, L., Singh, I. P., & Han, J. (2003). Effect of Cycle-to-Cycle Variation in the Injection Pressure in a Common Rail Diesel Injection System on Engine Performance (SAE Technical Paper No. 2003-01-0699). SAE International. DOI: <https://doi.org/10.4271/2003-01-0699>.
12. Wang, Y., Xiao, F., Zhao, Y., Li, D., & Lei, X. (2015). Study on cycle-by-cycle variations in a diesel engine with dimethyl ether as port premixing fuel. *Applied Energy*, 143, 58-70. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.12.079>.
13. Minchev, D., Varbanets, R., Zalozh, V., Ahieiev, M., & Psariuk, S. (2023). Improvement of the fuel combustion model in a digital twin application for diesel engines. *Transport Development*, 4(19), 108-124. DOI: <https://doi.org/10.33082/td.2023.4-19.09>.
14. Minchev, D., Varbanets, R., Aleksandrovska, N., & Pisintsaly, L. (2021). Marine diesel engines operating cycle simulation for diagnostics issues. *Acta Polytechnica*, 61(3), 428-440. DOI: <https://doi.org/10.14311/AP.2021.61.0435>.
15. Varbanets, R., Minchev, D., Kucherenko, Y., Zalozh, V., Kyrylash, O., & Tarasenko, T. (2024). Methods of real-time parametric diagnostics for marine diesel engines. *Polish Maritime Research*, 31(3), 71-84. DOI: <https://doi.org/10.2478/pomr-2024-0037>.
16. Varbanets, R., Minchev, D., Kucherenko, Y., & Zalozh, V. (2024). Real-time parametric diagnostics of marine diesel engines. *Internal Combustion Engines*, 1(2024), 69-75. DOI: <https://doi.org/10.20998/0419-8719.2024.1.09>.

Zalozh V., Varbanets R., Minchev D.

REAL-TIME ANALYSIS OF CYCLE-TO-CYCLE VARIATIONS FOR MARINE DIESEL ENGINES

This study presents a methodology for assessing marine diesel engine operational stability based on real-time analysis of parameters calculated from pressure and vibro diagrams. Methods for rapid diagnostics of main engine systems through the analysis of consecutive working cycles are proposed. A new comprehensive indicator - the Cycle Irregularity Index (CII) - has been developed, providing an integrated assessment of engine operational stability in real-time. Variance analysis of key operating process parameters' deviations is employed for quantitative determination of irregularity. The study proposes criteria for evaluating the stability of fuel injection process and valve timing mechanism based on dispersion analysis of vibration signal fronts. The developed methodology not only enables diagnostics of cycle-to-cycle variations but also allows optimization of engine systems settings with immediate performance monitoring during operation. The real-time diagnostic system provides recording and processing of in-cylinder pressure signals throughout a sequence of working cycles, enabling detection and quantitative assessment of parameter variations during compression and combustion phases. Simultaneously, numerical analysis of vibro diagrams is performed at fuel injection and valve closure intervals. Comparative analysis of vibration signals during the compression phase enables detection of valve gear malfunctions, while examination of vibration diagrams during the combustion phase provides diagnostics of high-pressure fuel equipment instability. The practical value of this work lies in developing a comprehensive methodology for operational diagnostics of marine diesel engine technical condition, enabling detection of deviations in main systems' operation and timely implementation of necessary corrective measures.

Keywords: cycle irregularity index, diesel engine, fuel combustion, working process, diagnostics, valve timing mechanism.