

М.І. Будуров

ОПТИМІЗАЦІЯ НАЛАШТУВАННЯ ЕЛЕКТРОННОГО РЕГУЛЯТОРА ЧАСТОТИ ОБЕРТАННЯ СУДНОВОГО ДИЗЕЛЯ

Система автоматичного регулювання частоти обертання (САРЧ) є визначальною у забезпеченні стабільності роботи дизелів, які є найпоширенішими первинними приводами на судах. Сучасні дизельні установки обладнуються електронними регуляторами частоти обертання (РЧО), які мають технічну можливість налаштування відповідно до змінних умов плавання судна. Однак на практиці параметри налаштування регулятора встановлюються для конкретного режиму без урахування стохастичності зовнішніх умов плавання, що призводить до незадовільного регулювання частоти обертання на інших режимах. Це створює проблему забезпечення оптимальної роботи САРЧ з електронними РЧО в експлуатації, особливо за складних погодних умов. У зв'язку з цим метою дослідження є оптимізація налаштування електронного РЧО з урахуванням стохастичності навантаження в усьому діапазоні можливих експлуатаційних режимів судових дизелів. Методика проведення дослідження включає використання методів чисельного та математичного моделювання, а також дозволяє врахувати стохастичні характеристики збурюючого впливу з боку гребного гвинта, зміни тиску газів у циліндрах дизеля, динамічні властивості елементів РЧО та нелінійності САРЧ. Методика апробована на головній дизельній установці HYUNDAI-MAN B&W 6S60MC-C7 танкеру "CATALAN SEA" на різних експлуатаційних режимах роботи та при зміні у широкому діапазоні умов плавання судна. В результаті дослідження визначені оптимальні налаштування електронного регулятора Nabtesco MG-800 за критерієм мінімуму нестабільності амплітуди коливань частоти обертання колінчастого валу дизеля при виконанні умови щодо допустимої нестабільності теплового режиму. Це дозволило підвищити стабільність роботи дизеля та зменшити питому ефективну витрату палива на 1,5...4,3 % на основних експлуатаційних режимах роботи. Наведені у роботі рекомендації щодо налаштування електронного РЧО можуть використовуватися під час експлуатації судових дизелів для підвищення стабільності роботи.

Ключові слова: судовий дизельний двигун; індикаторний момент; стабільність швидкісного режиму; регулятор частоти обертання; хвилювання моря.

Вступ

Переважає більшість суден, які знаходяться в експлуатації, мають у складі своїх енергетичних установок дизельні двигуни, тому що вони є найперспективнішими первинними приводами [1]. Водночас судові дизелі суттєво впливають на безпеку мореплавства та експлуатуються у складних умовах під час зміни навантаження у широкому діапазоні. У свою чергу, найбільш відповідальною системою судових дизелів із погляду безпеки є система автоматичного регулювання частоти обертання (САРЧ). Від її роботи залежить не тільки стабільність швидкісного режиму дизеля, але і його можливості адекватно реагувати на ступеневі або періодичні зміни навантаження, а також "провали" навантаження під час хитами на морі або оголенні гребного гвинта. Загальна тенденція переходу на електронну елементну базу, зокрема широке використання контролерів, сприяла впровадженню електронних регуляторів частоти обертання (РЧО), особливо в нових конструкціях дизелів [2]. У свою чергу, електронні РЧО мають велику кількість параметрів налаштування, у тому числі з можливістю регулювання нечутливості, які потрібно налаштовувати в залежності від конструкції судна, районів плавання та погодних умов, тобто в умовах змінної й нестабільної експлуатації. Наприклад, у склад електронної системи управління головного двигуна (ГД) фірми Nabtesco типу M-800-III входить електронний РЧО MG-800,

який має 306 параметрів налаштування [3]. Однак на практиці параметри налаштування регулятора встановлюються для конкретного режиму без урахування мінливості зовнішніх умов плавання, насамперед хвилювання моря. Тому навіть вдало обране налаштування для одного режиму призводить до незадовільного регулювання частоти обертання на інших експлуатаційних режимах. У свою чергу, для судового персоналу створюється ситуація невизначеності, який змушений налаштовувати електронні РЧО без належного врахування взаємовпливу його параметрів, покладаючись на власну інтуїцію. Викладене висвітлює практичну проблему забезпечення оптимальної роботи САРЧ з електронними РЧО в експлуатації, особливо за складних погодних умов, для яких характерні зміни навантажень дизелів у широкому діапазоні.

Найбільша проблема виникає під час налаштування нечутливості, тому що характер і величина змін навантаження на судовий дизель при хвилюванні залежать від багатьох змінних зовнішніх умов, а будь-яке задане значення нечутливості РЧО виявляється оптимальним лише для конкретного випадку руху судна. Це призводить до того, що регулятори не забезпечують належної стабільності швидкісних режимів за різних умов хвилювання, які характеризуються різною інтенсивністю та періодичністю коливань моменту опору на гребному валу [4]. У зв'язку з викладеним постає завдання визначення

параметрів налаштування електронного РЧО, зокрема нечутливості, що дозволяє краще адаптувати роботу САРЧ в усьому діапазоні можливих експлуатаційних режимів суднових дизелів. Експериментальний підбір нечутливості для всіх імовірних робочих режимів – надто ресурсомісткий процес. Найбільш обґрунтованим у цьому випадку є застосування математичного моделювання. Однак, для забезпечення достовірності рекомендацій щодо нечутливості, модель повинна враховувати зміну крутного моменту впродовж робочих циклів, оскільки його коливання в межах одного циклу можуть досягати 20 % [5]. Такі зміни крутного моменту відтворюються моделлю [6], яка враховує динаміку РЧО, робочі процеси в циліндрах дизеля, а також нелінійності САРЧ. Проте для налаштування параметрів регулятора є досить складною, оскільки у ній моделюються процеси у газоповітряному тракті, вплив яких на динаміку САРЧ є несуттєвим [7].

Метою роботи є оптимізація налаштування електронного РЧО з урахуванням стохастичного навантаження в усьому діапазоні можливих експлуатаційних режимів суднових дизелів.

Аналіз виконаних досліджень

Судна торгового флоту здійснюють тривалі рейси у складних експлуатаційних умовах, пов'язаних із хвилюванням моря, під час якого момент опору гребного гвинта практично ніколи не дорівнює паспортному і в ряді випадків перевищує паспортне значення [8]. Виходячи із статистичних даних значень сили вітру та розподілу висот хвиль, повторюваність швидкостей вітру (у балах шкали Бофорта) на лініях торгових суден становить: 0 ... 4 бали – 63,8 %, 5 балів – 18,1 %, 6 балів – 9,9 %, 10 і більше балів – 0,2 % [9]. Для силових установок відчутним вважається хвилювання, спричиненого силою вітру 5 балів та більше, тому можна приблизно вважати, що пропульсивні установки працюють на нестационарних режимах, пов'язаних із хвилюванням моря, третю частину свого ходового часу. Це означає, що САРЧ головних суднових дизелів повинні забезпечувати стабільність швидкісного режиму за різних амплітуд і періодів коливань навантаження на дизель.

Під час оптимізації параметрів РЧО потрібно враховувати, що амплітуда та частота збурюючого впливу залежать від розмірів судна, району плавання, імовірних курсів руху судна та змін погодних умов особливо під час зміни пір року [10]. Суттєвим є те, що задана частота обертання колінчатого валу дизеля прямо пропорційна амплітуді коливання моменту опору гребного гвинта [11]. У свою чергу, особливістю збурюючого впливу на дизель під час

хвилювання моря є його залежність від кутової швидкості валу дизеля [12]. У першому наближенні для цього можна використовувати статичну гвинтову залежність, яка дозволяє перераховувати експериментальні реалізації моменту опору гребного гвинта у процеси збурюючого впливу на пропульсивну установку [13]. Врахування відхилень кутової швидкості валу дизеля від середнього значення істотно уточнює значення функції збурюючого впливу.

Одним із ключових факторів, що зумовлює нестабільність частоти обертання дизеля впродовж циклу є варіація сумарного індикаторного моменту, яка зумовлена зміною тиску газів у циліндрах, механічними втратами на тертя та динамічними характеристики колінчастого валу [14]. У [15] доведено, що внаслідок цих факторів у дизельних двигунах виникає періодична нестабільність швидкісного режиму. За даними [16], для чотиритактних дизелів встановлено, що під час такту стиснення частота обертання поступово знижується, досягаючи мінімального значення поблизу верхньої мертвої точки, а на початку такту розширення максимальне значення частоти обертання фіксується приблизно при 385 градусів повороту колінчастого валу. Аналіз досліджень [17] також підтверджує, що у межах одного робочого циклу кожна періодична хвиля зміни частоти обертання підпорядковуються синусоїдальному закону, який корелює з процесом згоряння в кожному окремому циліндрі.

Якщо дизель використовується як головний на суднах, то нечутливість регулятора додатково дозволяє змінювати реакцію регуляторів на коливання моменту опору гребного валу під час хвилювання моря [18]. Однак на практиці під час оптимізації налаштування РЧО дизеля визначаються з усередненим за робочий цикл вхідним сигналом регулятора. Це призводить до того, що налаштування РЧО не забезпечує задовільну стабільність швидкісних режимів особливо під час зміни різної інтенсивності та періоду коливань моменту опору на гребному валу [19]. У зв'язку з цим удосконалення налаштування електронних РЧО з урахуванням стохастичності збурюючого впливу на головну дизельну установку під час хвилювання моря може покращити стабільність роботи САРЧ у всьому діапазоні можливих експлуатаційних режимів роботи суднових дизелів.

Методика проведення досліджень

Об'єктом дослідження є двотактний ГД HYUNDAI-MAN B&W 6S60MC-C7 танкеру "CATALAN SEA". Даний дизель розвиває номінальну потужність 13560 кВт і номінальну частоту обертання 105 хв⁻¹, а також номінальний тиск згоряння 15 МПа, є крейцкопфним, шестициліндровим, реверсивним, має ізобарну систему наддування, яку

забезпечує турбокомпресор Hyundai-ABB TPL80B12. Передача на гребний гвинт – пряма. Експериментальні показники роботи дизеля наведені в конструкторській документації [20]. Двигун обладнаний електронною системою управління Nabtesco, яка складається з системи дистанційного автоматичного керування типу М-800-III, електронного РЧО типу MG-800 та системи захисту.

Дослідження виконано із використанням результатів роботи [21], у якій розроблена модель САРЧ з електронним РЧО, що передбачає можливість реалізації будь-якого закону регулювання. Ця модель враховує запізнення в каналі передачі керувального впливу від регулятора до дизеля та дозволяє аналізувати вплив параметрів налаштування РЧО на динамічні характеристики САРЧ.

Побудова математичної моделі реалізовувалася із використанням алгоритму розрахунку обертання валу дизеля [22], згідно з яким індикаторний крутний момент дизеля розраховується відповідно до залежності:

$$M_i = \text{sign}(n) z \frac{\pi D^2 s}{8 \varphi_c} \int_0^{\varphi_c} (p - p_a) b d\varphi, \quad (1)$$

де n – частота обертання дизеля, хв^{-1} ; z – кількість циліндрів дизеля; D – діаметр циліндра, м; s – хід поршня, м; φ_c – кут повороту кривошипу за цикл, град.; p – тиск газів у циліндрі, Па; p_a – атмосферний тиск (прийнято рівним 101325), Па; b – відносна швидкість ходу поршня.

У розробленій моделі багатциліндрового судового дизеля як об'єкта регулювання частоти обертання, розраховуються робочі цикли в усіх циліндрах, але в однозначній залежності від подачі палива (тобто вихідного сигналу РЧО). Це дозволяє врахувати варіації крутного моменту між циліндрами, які відображаються у коливаннях кутової швидкості колінчастого валу в межах одного циклу. Розрахунок зміни тиску газів в циліндрі судового дизеля виконується за методом, що наведений у роботі [23]. У зв'язку з тим, що використання даної моделі для аналізу навантажень дизеля не передбачається, то у ній можна припустити, що на режимах дизеля, які вибрані для налаштування РЧО, система наддування забезпечує задовільне згоряння палива. Це дозволяє не включати в модель описання динамічних процесів у системі газотурбінного наддування, що суттєво спрощує як модель, так і розв'язання задач моделювання. Така модель дозволить отримати близький до реального сигнал, що надходить на вхід РЧО.

У свою чергу, переміщення поршня на будь-якій ділянці ходу виражається через кут повороту кривошипу за допомогою точної залежності безроз-

мірної величини [24], що визначає швидкість поршня:

$$b = \left[\sin \varphi + \frac{\lambda \sin 2\varphi}{2\sqrt{1-\lambda^2 \cdot \sin^2 \varphi}} \right], \quad (2)$$

де φ – кут повороту кривошипу, рад.; λ – відношення радіуса кривошипу до довжини шатуна.

Дослідження проведено з урахуванням результатів роботи [25], у якій обґрунтовано коректність припущень щодо стаціонарності та нормальності збурювального впливу на дизельну установку при хвилюванні моря, зокрема через те, що досліджувана система містить лінійні інерційні ланки, які нормалізують закон розподілу випадкових сигналів. Із цієї роботи також запозичені кількісні залежності змін дисперсії збурюючого впливу від бальності вітру за шкалою Бофорта, а також взаємозв'язок параметрів α і β ($\alpha \approx 0,16\beta$), що характеризують ступінь загасання та середню частоту кореляційної функції.

Спектральну густину збурюючого впливу рекомендовано задавати таким чином, щоб вона мала найменшу густину потужності при низьких частотах. У зв'язку з цим для моделювання використовувалося її наближення відповідною поліноміальною функцією [26]. Сигнал з такою спектральною густиною сформований за допомогою джерела псевдо білого шуму, вихід якого підключений до лінійної інерційної ланки з передатною функцією W_λ .

Як критерій оптимальності обрано мінімум нестабільності параметра регулювання, тобто амплітуди коливань частоти обертання колінчастого валу дизеля. Цей мінімум повинен досягатися, передусім, при виконанні додаткової умови щодо допустимої нестабільності подачі пального в дизель (нестабільності теплового режиму).

Для дослідження застосовувалася також методика чисельного моделювання робочих процесів дизелів, в якій удосконалено алгоритм визначення масивів значень витрати та ентальпії газів, що виходять із циліндра, залежно від кута повороту кривошипу [27].

Результати дослідження

На рис. 1 наведена структурна схема САРЧ судового дизеля HYUNDAI-MAN B&W 6S60MC-C7 з електронним регулятором Nabtesco MG-800 та розробленим блоком обліку циклічності роботи дизеля, який відтворює циклову нестабільність крутного моменту. До блоку надходять наступні сигнали:

- змінний з часом керуючий сигнал величини паливоподачі;
- постійний для досліджуваного режиму роботи дизеля сигнал значення кута випередження упорскування палива;

• циклічно-змінний сигнал кута повороту колінчастого валу дизеля, який змінюється з часом у діапазоні, що характерний для дизелів різної тактності, пропорційно кутовій швидкості обертання валу.

Конструктивно у регуляторі замість "жорсткої зони нечутливості" (коли регулятор взагалі не реагує на зміну вхідного сигналу) застосовується зменшення коефіцієнта передачі сигналу k_g , що знижує чутливість регулятора при малих відхиленнях частоти обертання дизеля. У зв'язку з цим у роботі ця

зона названа зоною пониженої чутливості (ЗПЧ). Водночас вплив коефіцієнта передачі разом із величиною ширини зони, в якій він діє, впливають на динаміку РЧО аналогічним чином. Тому значення коефіцієнта встановлено на рівні 0,5 відн. од., а вплив ширини зони при різній інтенсивності та періодах хвилювання моря досліджувався шляхом зміни ширини ЗПЧ – ϵ , відн. од.

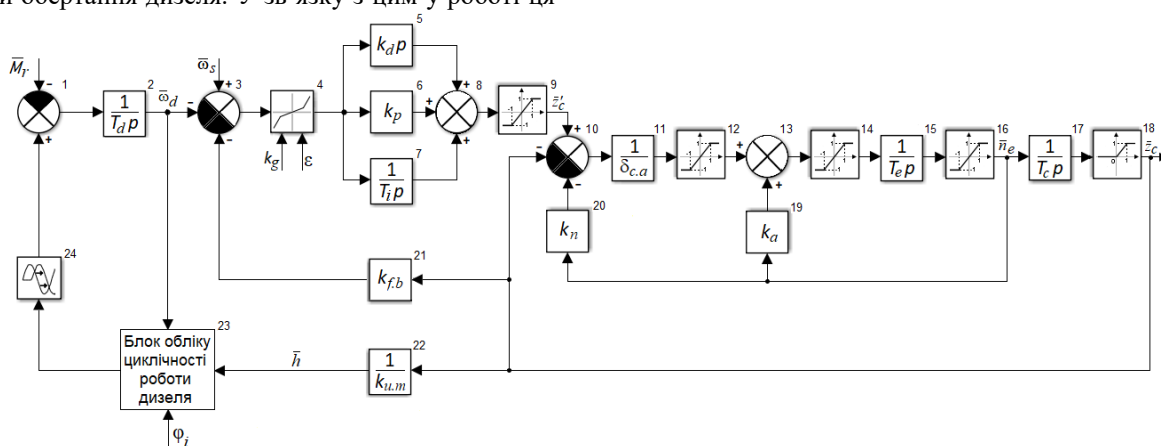


Рис. 1. Структурна схема САРЧ суднового дизеля HYUNDAI-MAN B&W 6S60MC-C7 з електронним РЧО Nabtesco MG-800: 1, 3, 8, 10, 13 – суматори; 2, 7, 15, 17 – інтегруючі ланки; 4 – функціональний перетворювач, який вводить ЗПЧ; 5 – диференціююча ланка; 6, 11, 19, 20, 21, 22 – пропорційні ланки; 9, 12, 14, 16 – нелінійні ланки, які враховують насичення сигналу на рівні ± 1 ; 18 – нелінійна ланка, яка враховує насичення сигналу в діапазоні $0 \dots 1$; 23 – блок обліку циклічності роботи дизеля; 24 – нелінійна ланка з часом запізнення τ_{del} , що враховує запізнення зміни відносного індикаторного моменту дизеля щодо зміни відносного ходу рейки паливних насосів $\bar{h}$

Збурення на систему наноситься по каналу навантаження зміною відносного моменту опору на валу дизеля $\bar{M}_r$. ГД представлений у вигляді інтегруючої ланки 2 з часом розгону дизеля T_d , який розраховувався з урахуванням моментів інерції кривошипно-шатунного механізму, маховика, гребного валу та гвинта, маси води, а також приєднаної до гребного гвинта (під час його обертання). Елементи 3 – 9 формують необхідне значення ходу виконавчого механізму (ВМ) $\bar{z}_c'$, яке "відпрацьовується" елементами 10 – 20. Ланкою 4 задається величина ЗПЧ до розбалансу сигналів $\bar{\omega}_d$ і $\bar{\omega}_s$. Ланки 5, 6 і 7 формують керуючий сигнал за пропорційно-інтегрально-диференціальним законом регулювання. ВМ має два зворотні зв'язки: за положенням роликової гайки (вихідному сигналу $\bar{z}_c$) та за частотою обертання електродвигуна $\bar{n}_e$. Електродвигун на схемі представлений інтегруючою ланкою 15. Перетворювач частоти обертання електродвигуна в хід гайки

зображений на схемі інтегруючою ланкою 17. Зворотний зв'язок із ланкою 21 використовується у разі забезпечення паралельної роботи дизелів.

На рис. 2 показана модель САРЧ суднового дизеля HYUNDAI MAN B&W 6S60MC-C7 з електронним регулятором NABTESCO MG-800 та розробленим блоком обліку циклічності роботи дизеля, що відтворює циклову нестабільність крутного моменту, яка призводить до нестабільності вхідного сигналу РЧО. Використовувалися такі значення параметрів: час розгону дизеля $T_d = 2,3$ с; кут випередження упорскування палива $\phi_i = -2,5$ град. ПКВ; час запізнення τ_{del} , розрахований за формулою з [28], та для номінального режиму складає 0,024 с; відносна ширина ЗПЧ $\epsilon = 0 \dots 0,08$ відн. од.; коефіцієнт передачі ЗПЧ $k_g = 0,5$ відн. од.; коефіцієнт підсилення пропорційної ланки $k_p = 0,5 \dots 5$ відн. од.; час інтегруючої ланки $T_i = 0,5 \dots 8$ с; час диференціюючої ланки $k_d = 0 \dots 0,4$ с; час ВМ РЧО $T_c = 0,4$ с; нерівномірність керуючого елемента ВМ $\delta_{c.a} = 0,04$ відн. од.; час розгону виконавчого електродвигуна $T_e = 0,03$ с; коефіцієнт передачі ланки, що форсує розгін і гальмування виконавчого електродвигуна

$k_a = 0,3$ відн. од.; коефіцієнт передачі зворотного зв'язку за частотою обертання виконавчого електродвигуна $k_n = 0,06$ відн. од.; коефіцієнт використання ходу регулятора при переході від нульової

подачі палива до номінальної $k_{u,m} = 0,8$ відн. од.; коефіцієнт зворотного зв'язку $k_{f,b} = 0$ відн. од.

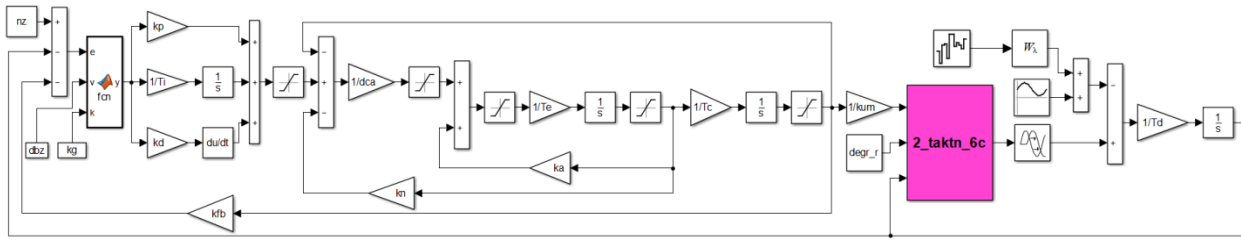


Рис. 2. Модель САПЧ суднового дизеля HYUNDAI–MAN B&W 6S60MC-C7 з електронним регулятором NABTESCO MG-800 та розробленим блоком обліку циклічності роботи дизеля

Із (1) випливає, що індикаторний крутний момент визначається інтегралом по куту повороту кривошипа від різниці між тиском у циліндрі та атмосферним тиском, помноженою на відносну швидкість ходу поршня (2). Відповідно, будь-які зміни тиску газів усередині циліндра прямо впливають на значення індикаторного крутного моменту. Верифікація моделі для розрахунку індикаторного моменту може бути виконана шляхом порівняння результатів обчислень тиску газів із даними, отриманими за допомогою вже перевірених, усталених моделей. Отже, оскільки тісно пов'язана з тиском газів залежність індикаторного моменту є очевидною, достатньо підтвердити збіг розрахункових значень тиску для впевненості у коректності самої

моделі. На рис. 3 зіставлені індикаторні діаграми досліджуваного ГД, які побудовані за даними розрахунку зміни тиску газів у першому циліндрі на розробленій моделі та за допомогою чисельного моделювання. Із рис. 3 слідує, що зміни тиску газів у розробленій моделі практично збігаються з перевіреними за допомогою чисельного моделювання. Це свідчить, що модель адекватно відтворює реальну картину робочого процесу та, як наслідок, правильно розраховує індикаторний крутний момент. Аналіз середньоквадратичних відхилень (СКВ) між зіставленими індикаторними діаграмами показав, що їхнє СКВ не перевищує 5,7 %, що підтверджує адекватність розробленої моделі.

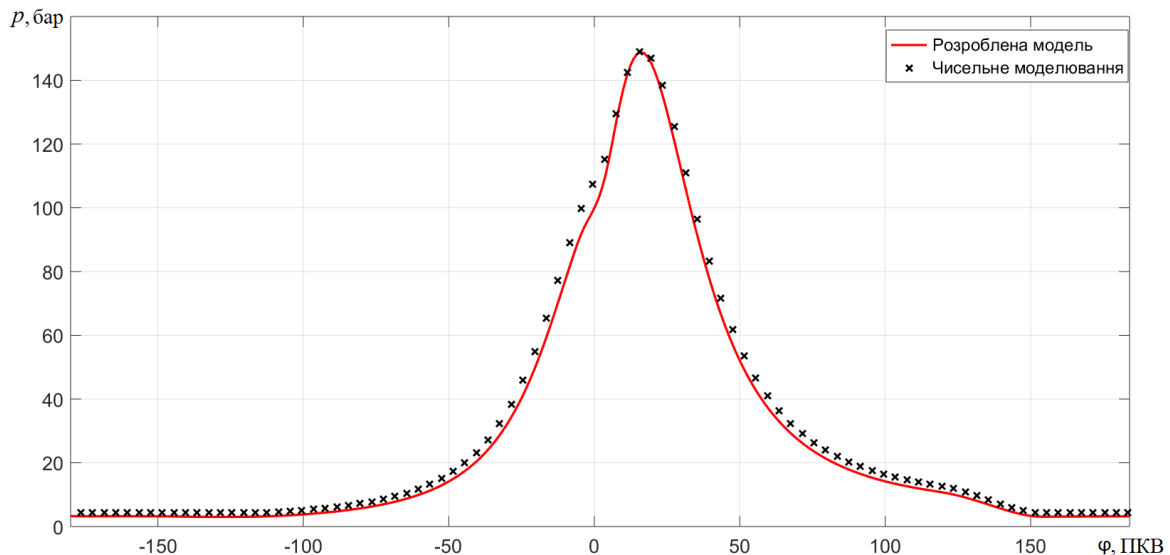


Рис. 3. Розрахункові індикаторні діаграми суднового двотактного дизеля HYUNDAI–MAN B&W 6S60MC-C7

На рис. 4 зображений вплив пониженої чутливості електронного РЧО (з базовими параметрами налаштування регулятора $k_p = 2,2$ відн. од.; $T_i = 2,0$

с; $k_d = 0$ с) на СКВ відносної частоти обертання дизеля – $\sqrt{D_n}$, та СКВ відносного ходу рейки ПНВТ – $\sqrt{D_h}$, за різної інтенсивності хвилювання (кількісно вираженої силою вітру за шкалою Бофорта).

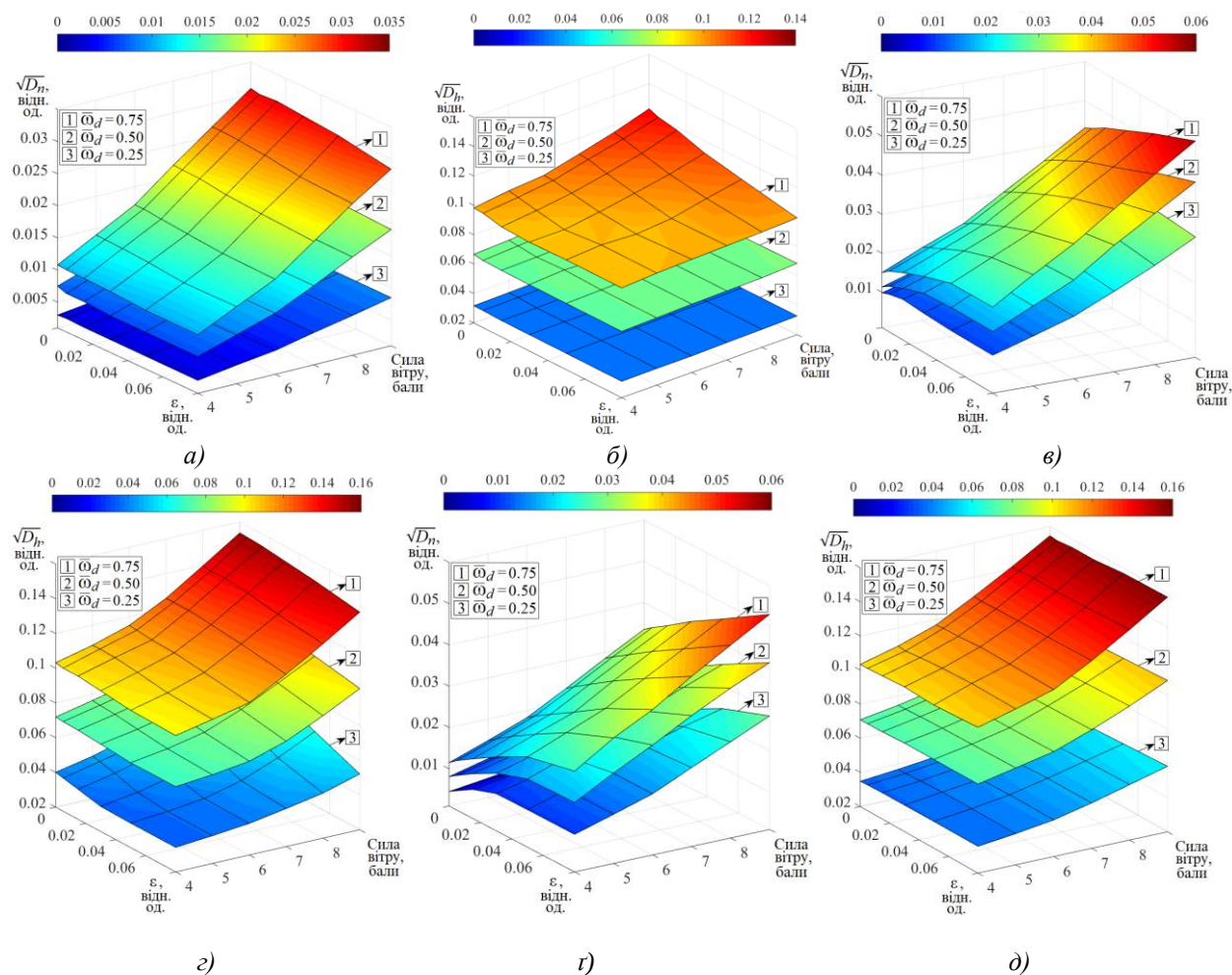


Рис. 4. Вплив пониженої чутливості електронного РЧО на $\sqrt{D_n}$ та $\sqrt{D_h}$ при зміні бальності вітру за шкалою Бофорта з періодом хвилювання моря: а, б – 3,3 с; в, г – 7,9 с; г, д – 20,9 с

Результати отримані при трьох середніх періодах коливань збуджуючого впливу $T_0 = 3,3; 7,9$ і $20,9$ с, які практично охоплюють весь діапазон значень, що трапляється в експлуатації. Дослідження виконувалося при малому, середньому та великому навантаженні на ГД, що відповідають експлуатаційним режимам з відносною частотою обертання дизеля $\bar{\omega}_d = 0,25; 0,5$ та $0,75$, відповідно.

У ході дослідження впливу пониженої чутливості РЧО встановлено:

– при $T_0 = 3,3$ с стабільність швидкісного та теплового режимів дизеля як за помірного (спричиненого силою вітру до 6 балів), так і за інтенсивного хвилювання (спричиненого силою вітру 6 балів і більше), покращується зі збільшенням ширини ЗПЧ (зменшенням чутливості) РЧО, що підтверджується зниженням оцінок $\sqrt{D_n}$ та $\sqrt{D_h}$ (рис. 4 а, б);

– при $T_0 = 7,9$ с при зменшенні чутливості РЧО (збільшенні ширини ЗПЧ), як за малої дисперсії збуджуючого впливу, так і за хвилювання моря, що спричиняє інтенсивні та значні зміни частоти обертання дизеля, спостерігається виграв у стабільності теплового режиму (зменшення $\sqrt{D_h}$), при цьому суттєвого покращення стабільності швидкісного режиму не відбувається (рис. 4 в, г);

– при $T_0 = 20,9$ с збільшення чутливості РЧО (зменшення ширини ЗПЧ) покращує динаміку РЧО в усьому діапазоні вітрового хвилювання, що підтверджується зменшенням $\sqrt{D_n}$ і $\sqrt{D_h}$ (рис. 4 г, д).

У табл. 1 приведені оптимальні налаштування пониженої чутливості електронного РЧО при різних середніх періодах коливань та дисперсії збуджуючого впливу. Результати наведено для малого, середнього та великого навантаження ГД, що відповідають режимам $\bar{\omega}_d = 0,25; 0,5$ та $0,75$, відповідно.

Таблиця 1. Оптимальні налаштування пониженої чутливості електронного РЧО при різних періодах коливань та дисперсії збурюючого впливу

$\bar{\omega}_d$	ε , відн. од.					
	Сила вітру при $T_0 = 3,3$ с		Сила вітру при $T_0 = 7,9$ с		Сила вітру при $T_0 = 20,9$ с	
	4–6 балів	7–9 балів	4–6 балів	7–9 балів	4–6 балів	7–9 балів
0,25	0,02	0,04	0,015	0,010	0,005	0,002
0,50	0,03	0,05	0,030	0,015	0,007	0,003
0,75	0,05	0,07	0,035	0,025	0,010	0,005

На рис. 5 зображений вплив коефіцієнту підсилення пропорційної ланки електронного РЧО (з параметрами налаштування пониженої чутливості РЧО відповідно до табл. 1 та $T_i = 2,0$ с; $k_d = 0$ с) на СКВ відносної частоти обертання дизеля та відносного ходу рейки ПНВТ. Результати отримані при

зміні бальності вітру за шкалою Бофорта та для трьох середніх періодів коливань збурюючого впливу $T_0 = 3,3$; $7,9$ і $20,9$ с. Дослідження виконувалося при відносній частоті обертання дизеля $\bar{\omega}_d = 0,25$; $0,5$ та $0,75$.

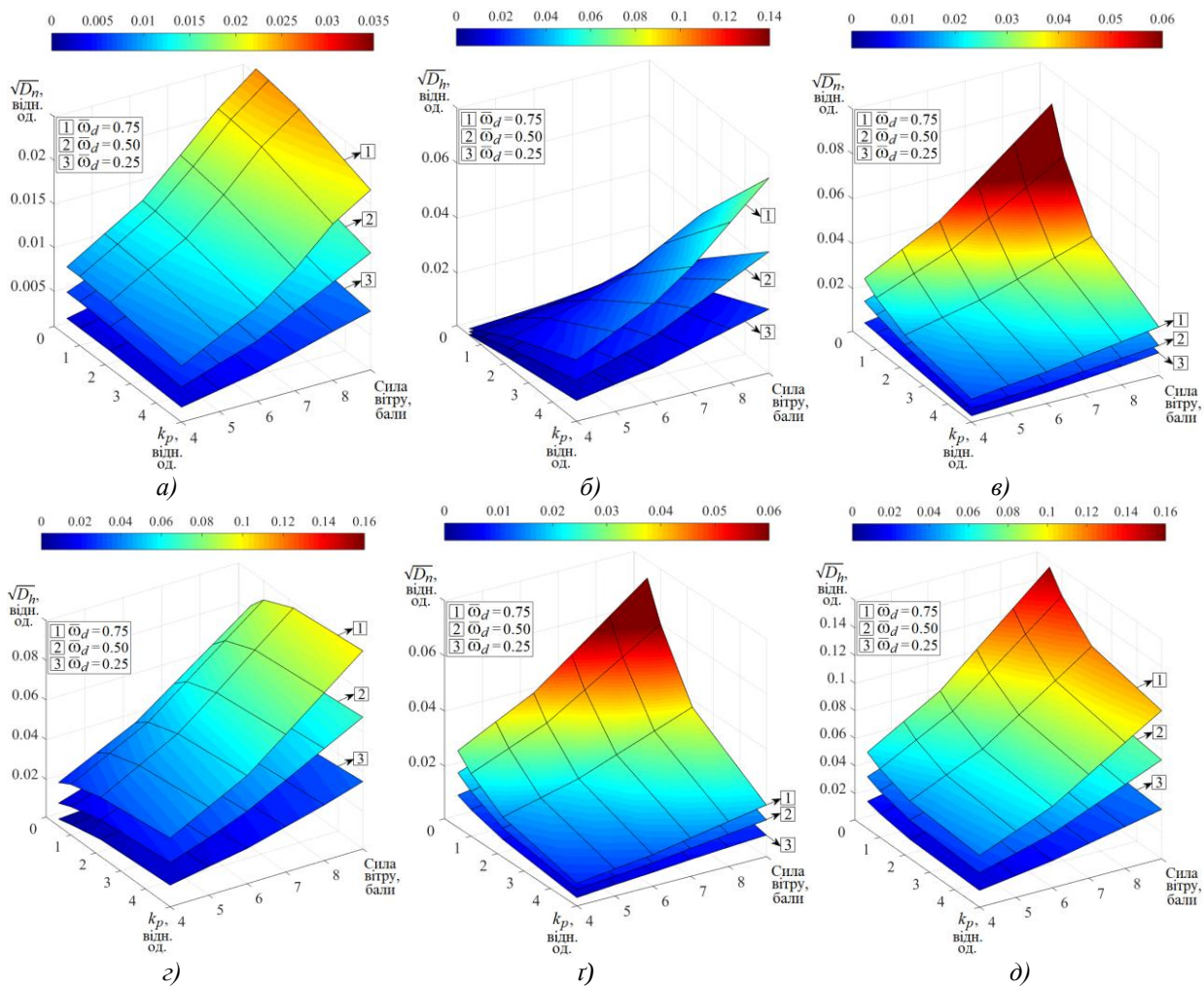


Рис. 5. Вплив пропорційної ланки електронного РЧО на $\sqrt{D_n}$ та $\sqrt{D_h}$ при зміні бальності вітру за шкалою Бофорта з періодом хвилювання моря: а, б – 3,3 с; в, г – 7,9 с; д, е – 20,9 с

За результатами дослідження впливу коефіцієнту підсилення пропорційної ланки РЧО слідус:

– при $T_0 = 3,3$ с зменшення k_p покращує стабільність швидкісного режиму роботи ГД, одночасно погіршуючи стабільність теплового режиму. Однак

занадто мале значення може призвести до недостатньої здатності до слідування командам завдання через незадовільний час відгуку (рис. 5 а, б);

– при $T_0 = 7,9$ с спостерігається підвищення ста-

більності частоти обертання при збільшенні k_p , водночас показники теплового режиму погіршуються. Однак занадто мале значення призводить до погіршення динаміки РЧО, особливо при інтенсивному хвилюванні (рис. 5 в, з);

– при $T_0 = 20,9$ с збільшення k_p призводить до покращення стабільності як швидкісного, так і теплового режимів роботи ГД. При цьому в області малих

значень k_p спостерігається явище перерегулювання в САРЧ (рис. 5 г, д).

У табл. 2 приведені оптимальні налаштування пропорційної ланки електронного РЧО при різних середніх періодах коливань та дисперсії збурюючого впливу. Результати наведено для режимів роботи ГД при $\bar{\omega}_d = 0,25; 0,5$ та $0,75$.

Таблиця 2. Оптимальні налаштування пропорційної ланки електронного РЧО при різних періодах коливань та дисперсії збурюючого впливу

$\bar{\omega}_d$	k_p , відн. од.					
	Сила вітру при $T_0 = 3,3$ с		Сила вітру при $T_0 = 7,9$ с		Сила вітру при $T_0 = 20,9$ с	
	4–6 балів	7–9 балів	4–6 балів	7–9 балів	4–6 балів	7–9 балів
0,25	0,5	0,6	1,7	2,2	2,9	3,2
0,50	0,6	0,7	2,3	2,9	3,1	3,5
0,75	0,7	0,8	3,1	3,4	3,3	3,9

На рис. 6 зображений вплив часу інтегрування електронного РЧО (з параметрами налаштування пониженої чутливості РЧО та пропорційної ланки відповідно до табл. 1 і 2 та $k_d = 0$ с) на $\sqrt{D_n}$ та $\sqrt{D_h}$ при зміні бальності вітру за шкалою Бофорта та для

$T_0 = 3,3; 7,9$ і $20,9$ с. Дослідження виконувалося при малому, середньому та великому навантаженні на ГД, що відповідають $\bar{\omega}_d = 0,25; 0,5$ та $0,75$, відповідно.

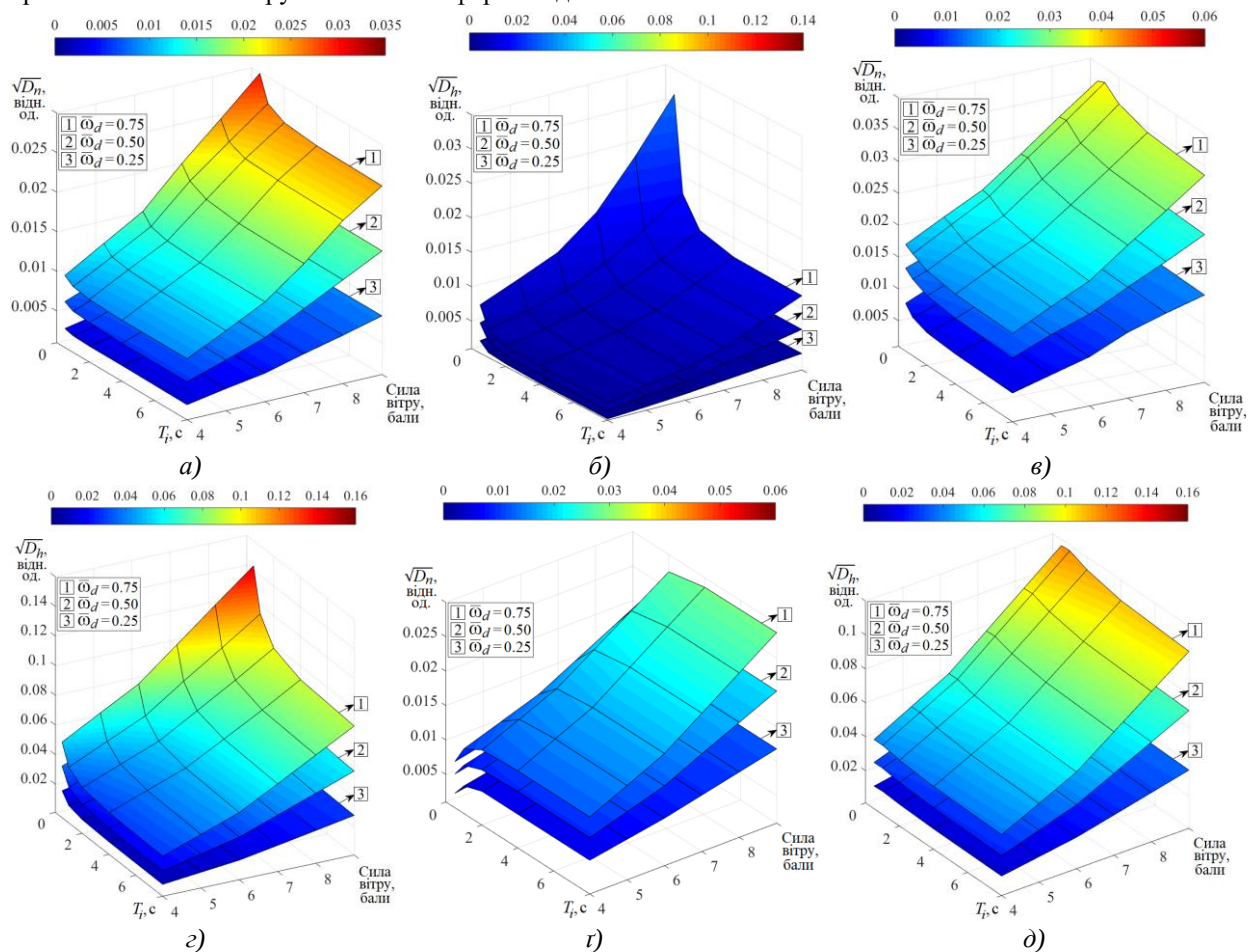


Рис. 6. Вплив інтегруючої ланки електронного РЧО на $\sqrt{D_n}$ та $\sqrt{D_h}$ при зміні бальності вітру за шкалою Бофорта з періодом хвилювання моря: а, б – 3,3 с; в, г – 7,9 с; г, д – 20,9 с

Дослідження впливу інтегруючої ланки РЧО дозволяє зробити висновок:

- при $T_0 = 3,3$ с збільшення T_i підвищує стабільність швидкісного та теплового режимів роботи ГД у всьому діапазоні вітрового хвилювання від 4 до 9 балів за шкалою Бофорта. При цьому занадто велике значення може призвести до погіршення здатності слідування командам завдання у зв'язку зі зниженням швидкодії «відпрацювання» РЧО на зміні навантаження (рис. 6 а, б);
- при $T_0 = 7,9$ с збільшення T_i підвищує стабільність швидкісного та теплового режимів роботи дизеля. Однак занадто велике значення T_i призводить

до погіршення маневрових якостей судна у зв'язку зі зменшенням швидкодії РЧО (рис. 6 в, з);

- при $T_0 = 20,9$ с зменшення T_i призводить до підвищення стабільності швидкісного режиму ГД у всьому діапазоні вітрового хвилювання. При цьому спостерігається тенденція погіршення стабільності теплового режиму ГД (рис. 6 г, д).

У табл. 3 приведені оптимальні налаштування інтегруючої ланки електронного РЧО при різних середніх періодах коливань та дисперсії збурюючого впливу. Результати структуровані для режимів роботи ГД, що відповідають $\bar{\omega}_d = 0,25; 0,5$ та $0,75$.

Таблиця 3. Оптимальні налаштування інтегруючої ланки електронного РЧО при різних періодах коливань та дисперсії збурюючого впливу

$\bar{\omega}_d$	$T_i, \text{с}$					
	Сила вітру при $T_0 = 3,3$ с		Сила вітру при $T_0 = 7,9$ с		Сила вітру при $T_0 = 20,9$ с	
	4–6 балів	7–9 балів	4–6 балів	7–9 балів	4–6 балів	7–9 балів
0,25	6,3	5,9	5,8	5,4	2,3	2,1
0,50	6,0	5,5	5,3	5,0	1,8	1,4
0,75	5,2	4,8	4,7	4,1	1,2	0,9

На рис. 7 зображений вплив часу диференціювання електронного РЧО (з параметрами налаштування пониженої чутливості, пропорційної та інтегруючої ланок РЧО відповідно до табл. 1, 2 та 3) на $\sqrt{D_n}$ та $\sqrt{D_h}$ при зміні бальності вітру за шкалою Бофорта. Результати отримані при $T_0 = 3,3; 7,9$ і $20,9$ с та для $\bar{\omega}_d = 0,25; 0,5$ та $0,75$.

На основі дослідження впливу диференціюючої ланки РЧО встановлено:

- при $T_0 = 3,3$ с збільшення k_d спричиняє покращення стабілізації частоти обертання дизеля, однак це одночасно призводить до значної нестабільності теплового режиму роботи ГД. Для покращення стабільності швидкісного режиму дизеля на низьких навантаженнях ефективно задавати більші значення. Однак введення занадто великого значення k_d , особливо при збільшеному значенні k_p , призводить до сильних коливань частоти обертання або перерегулювання (рис. 7 а, б);
- при $T_0 = 7,9$ с збільшення k_d призводить до покращення стабільності швидкісного режиму при середньому навантаженні дизеля. Однак введення занадто великого значення k_d призводить до появи автоколивань в САРЧ та погіршення динаміки РЧО (рис. 7 в, з);

- при $T_0 = 20,9$ с спостерігається тенденція покращення стабілізації швидкісного режиму при зменшенні k_d у всьому діапазоні вітрового хвилювання. При цьому суттєвого впливу на зміни теплового режиму не виявляється (рис. 7 г, д).

У табл. 4 приведені оптимальні налаштування диференціюючої ланки електронного РЧО при різних середніх періодах коливань та дисперсії збурюючого впливу. Результати наведено для навантаження ГД, які відповідають режимам $\bar{\omega}_d = 0,25; 0,5$ та $0,75$.

Методика проведення дослідження дозволяє оптимізувати налаштування електронних РЧО судових дизелів з урахуванням стохастичності характеристик обурюючого впливу. Апробація методики на судовій дизельній установці HYUNDAI-MAN B&W 6S60MC-C7 судна "CATALAN SEA" продемонструвала підвищення стабільності регулювання в умовах зміни вітро-хвильових збурень у широкому діапазоні та покращення паливної економічності ГД. Експериментально отримані результати на основних експлуатаційних режимах роботи судового дизеля підтверджують зниження питомої ефективної витрати палива на 1,5...4,3 % під час використання запропонованої методики оптимізації налаштування електронного РЧО.

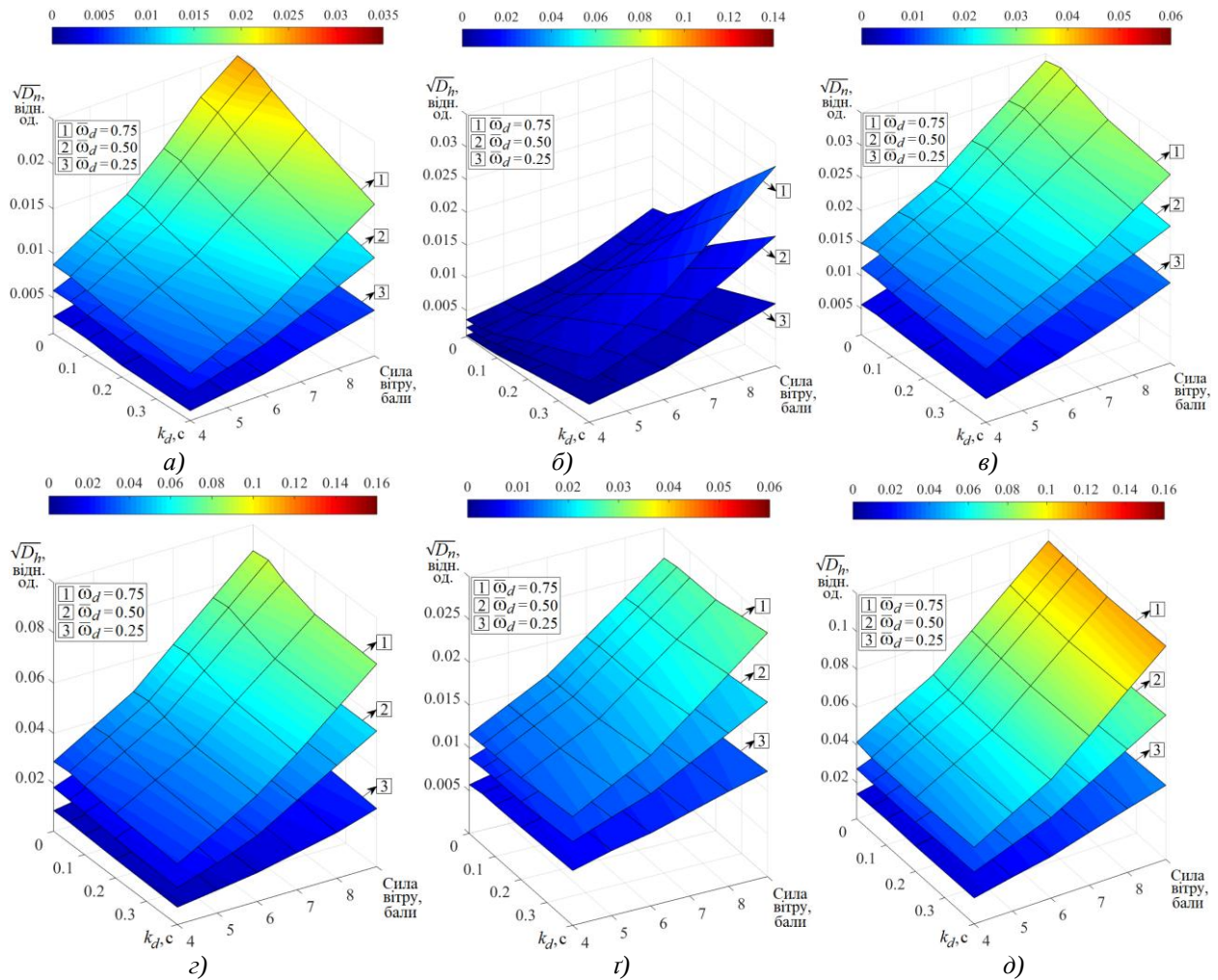


Рис. 7. Вплив диференціюючої ланки електронного РЧО на $\sqrt{D_n}$ та $\sqrt{D_h}$ при зміні бальності вітру за шкалою Бофорта з періодом хвилювання моря: а, б – 3,3 с; в, г – 7,9 с; д – 20,9 с

Таблиця 4. Оптимальні налаштування диференціюючої ланки електронного РЧО при різних періодах коливань та дисперсії збурюючого впливу

$\bar{\omega}_d$	$k_d, \text{с}$					
	Сила вітру при $T_0 = 3,3 \text{ с}$		Сила вітру при $T_0 = 7,9 \text{ с}$		Сила вітру при $T_0 = 20,9 \text{ с}$	
	4–6 балів	7–9 балів	4–6 балів	7–9 балів	4–6 балів	7–9 балів
0,25	0,15	0,25	0,20	0,30	0,10	0,05
0,50	0,10	0,20	0,15	0,25	0,07	0,03
0,75	0,08	0,15	0,05	0,20	0,02	0,00

Висновки

Практична реалізація методики проведення дослідження можлива на сучасних електронних РЧО на мікропроцесорній елементній базі, яка дозволяє створювати регулятор зі змінною структурою. Методика оптимізації параметрів налаштування електронного РЧО апробована для ГД HYUNDAI-MAN B&W 6S60MC-C7 на різних експлуатаційних режимах роботи та при зміні умов плавання судна у широкому діапазоні. У результаті знайдені оптимальні

за критерієм мінімуму нестабільності амплітуди коливань частоти обертання колінчастого валу дизеля при виконанні умови щодо допустимої нестабільності теплового режиму значення налаштувань електронного РЧО Nabtesco MG-800.

Наступне дослідження планується в області методичного забезпечення налаштування електронних РЧО головних судових дизелів за допомогою інтелектуальних алгоритмів оптимізації параметрів РЧО до стохастичних характеристик збурення.

Список літератури:

1. Сажин С. В. Підвищення ефективності роботи середньооборотних суднових дизельних двигунів / С. В. Сажин, Ю. В. Заблоцький, А. С. Сажин // *Водний транспорт*. – 2025. – № 1 (42). – С. 166 – 179. 2. Tijan E. Digital transformation in the maritime transport sector / E. Tijan, M. Jović, S. Aksentijević, A. Pucihar // *Technological Forecasting and Social Change*. – 2021. – № 170. – P. 1 – 15. 3. Tenkey Data List for MG-800 Governor System: № 74H63927-82B. – Nabtesco Corporation, 2011. – 16 p. 4. Taskar B. The effect of waves on engine-propeller dynamics and propulsion performance of ships / B. Taskar, K. Yum, S. Steen, E. Pedersen // *Ocean Engineering*. – 2016. – № 122. – P. 262 – 277. 5. Yang Z. Disturbance sources in the diesel engine combustion process / Z. Yang, T. Steffen, R. Stobart // *SAE Technical Paper*. – 2013. – № 2013-01-0318. – 14 p. 6. Maftai C. Simulation of the dynamics of a marine diesel engine / C. Maftai, L. Moreira, C. Soares // *Journal of Marine Engineering & Technology*. – 2009. – № 8(3). – P. 29 – 43. 7. Cheng M. Study on Intelligent Speed Control Algorithm for Diesel Engine / M. Cheng, S. Enzhe, Z. Guofeng, Y. Chong // *Proceedings of 14th International Naval Engineering Conference & Exhibition*. – 2018. – 12 p. 8. Gorb S. I. Increasing the Accuracy of a Marine Diesel Engine Operation Limit by Thermal Factor / S. I. Gorb, M. I. Budurov // *International Review of Mechanical Engineering (IREME)*. – 2021. – № 15 (3). – P. 115 – 121. 9. Sugianto D. Wave height forecasting using measurement wind speed distribution equation in Java Sea, Indonesia / D. Sugianto, M. Zainuri, A. Darari, Suripin, S. Darsono, N. Yuwono // *International Journal of Civil Engineering and Technology*. – 2017. – № 8 (5). – P. 604 – 619. 10. Aroucha L. Practical aspects of meteorology and oceanography for mariners: A guide for the perplexed / L. Aroucha, H. Duarte, E. Droguett, D. Veleda // *Cogent Engineering*. – 2018. – № 5 (1). – P. 1 – 23. 11. Горб С. И. Повышение эффективности работы главного двигателя корректировкой упора гребного винта / С. И. Горб, А. К. Сандлер, Н. И. Будуров // *Автоматизация судовых технических средств: науч.-техн. сб.* – 2019. – № 25. – Одесса: НУ "ОМА". – С. 35 – 52. 12. Горб С. И. Оптимизация главного двигателя на режиме экономического хода судна / С. И. Горб // *Автоматизация судовых технических средств: науч.-техн. сб.* – 2019. – № 25. – Одесса: НУ "ОМА". – С. 17 – 34. 13. Горб С. И. Оптимизация автоматического регулирования частоты вращения судового дизеля / С. И. Горб, Н. И. Будуров // *Автоматизация судовых технических средств: науч.-техн. сб.* – 2021. – № 27. – Одесса: НУ "ОМА". – С. 3 – 21. 14. Mei Q. Numerical Investigation on the Combustion and Emission Characteristics of Diesel Engine with Flexible Fuel Injection / Q. Mei, I. Naruemon, L. Liu, Y. Wu, X. Ma // *Machines*. – 2023. – № 11 (120). – 21 p. 15. Milasinovic A. Determination of the engine torque of a four cylinder four stroke diesel engine on the basis of harmonic analysis of the crankshaft angular velocity / A. Milasinovic, I. Filipovic, Z. Milovanovic, D. Knežević // *Transactions of FAMENA*. – 2011. – № 35. – P. 55 – 65. 16. Zhong L. Effect of Cycle-to-Cycle Variation in the Injection Pressure in a Common Rail Diesel Injection System on Engine Performance / L. Zhong, I. Singh, J. Han, M. Lai, N. Henein, W. Bryzik // *SAE Technical Paper*. – 2003. – № 2003-01-0699. – 12 p. 17. Kyrtatos P. Apparent effects of in-cylinder pressure oscillations and cycle-to-cycle variability on heat release rate and soot concentration under long ignition delay conditions in diesel engines / P. Kyrtatos, K. Hoyer, P. Obrecht, K. Boulouchos // *International Journal of Engine Research*. – 2013. – № 15

(3). – P. 325 – 327. 18. Sigmund S. Numerical and experimental investigation of propulsion in waves / S. Sigmund, O. Møctar // *Ocean Engineering*. – 2017. – № 144. – P. 35 – 49. 19. Cardoso D. An Innovative Mechanical Approach to Mitigating Torque Fluctuations in IC Engines during Idle Operation / D. Cardoso, P. Fael, P. Gaspar, A. Espírito-Santo // *Designs*. – 2024. – № 8 (47). – 20 p. 20. Shop Test Result for Main Engine HYUNDAI-MAN B&W 6S60MC-C7: № K630-IR11A-5984. – HHI-EMD, 2011. – 18 p. 21. Gorb S. Sensitivity Optimisation of a Main Marine Diesel Engine Electronic Speed Governor / S. Gorb, M. Levinskyi, M. Budurov // *Scientific Horizons*. – 2021. – № 24 (11). – P. 9 – 19. 22. Kazienko D. Instantaneous Rotational Speed Algorithm for Locating Malfunctions in Marine Diesel Engines / D. Kazienko, L. Chybowski // *Energies*. – 2020. – № 13. – P. 1 – 31. 23. Tsitsilonis K. A novel method for in-cylinder pressure prediction using the engine instantaneous crankshaft torque / K. Tsitsilonis, G. Theotokatos // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M*. – 2021. – № 236 (1). – P. 131 – 149. 24. Горб С. И. Повышение точности численного моделирования рабочих процессов дизелей / С. И. Горб // *Автоматизация судовых технических средств: науч.-техн. сб.* – 2020. – № 26. – Одесса: НУ "ОМА". – С. 3 – 26. 25. Usov A. Determination of optimal control of a vessel diesel engine during non-stationary traffic regimes. / A. Usov, M. Slobodianiuk, M. Nikolskyi // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – 2021. – № 6. – P. 136 – 146. 26. Lünser H. The Influence of Characteristic Sea State Parameters on the Accuracy of Irregular Wave Field Simulations of Different Complexity / H. Lünser, M. Hartmann, N. Desmars, J. Behrendt, N. Hoffmann, M. Klein // *Fluids*. – 2022. – № 7 (7). – P. 1 – 243. 27. Karaky H. Development and Validation of a New Zero-Dimensional Semi-Physical NOx Emission Model for a D.I. Diesel Engine Using Simulated Combustion Process / H. Karaky, G. Mauviot, X. Tauzia, A. Maiboom // *SAE International Journal of Engines*. – 2015. – № 8 (4). – P. 1924 – 1937. 28. Gorb S. Adjustment of the Speed Governor for a Marine Diesel Generator Engine / S. Gorb, A. Popovskii, M. Budurov // *International Journal of GEOMATE*. – 2023. – № 25(109). – P. 125 – 132.

Bibliography (transliterated):

1. Sagin, S. V., Zablotskyi, Y. V., Sagin, A. S. (2025), "Increasing the efficiency of ship's medium-speed diesel engines", *Water Transport* ["Pidvyshchennia efektyvnosti roboty serednoobertovykh sudnovykh dyzelnykh dyvuhuniv", *Vodnyi Transport*], № 1 (42), P. 166 – 179. doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.20 2. Tijan, E., Jović, M., Aksentijević, S., Pucihar, A. (2021), "Digital transformation in the maritime transport sector", *Technological Forecasting and Social Change*, № 170, P. 1 – 15. https://doi.org/10.1016/j.techfore.2021.120879 3. Tenkey Data List for MG-800 Governor System: № 74H63927-82B. (2011), Nabtesco Corporation, 16 p. 4. Taskar, B., Yum, K., Steen, S., Pedersen, E. (2016), "The effect of waves on engine-propeller dynamics and propulsion performance of ships", *Ocean Engineering*, № 122, P. 262 – 277. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2016.06.034 5. Yang, Z., Steffen, T., Stobart, R. (2013), "Disturbance sources in the diesel engine combustion process", *SAE Technical Paper*, № 2013-01-0318, 14 p. https://doi.org/10.4271/2013-01-0318 6. Maftai, C., Moreira, L., Soares, C. (2009), "Simulation of the dynamics of a marine diesel engine", *Journal of Marine Engineering & Technology*, № 8(3), P. 29 – 43. https://doi.org/10.1080/20464177.2009.11020225 7. Cheng, M., Enzhe, S., Guofeng, Z., Chong, Y. (2018), "Study on intelligent speed control algorithm for diesel engine", *Proceedings of 14th International Naval Engineering Conference & Exhibition*, 12 p. https://doi.org/10.24868/issn.2515-818X.2018.036 8. Gorb, S. I.,

- Budurov, M. I. (2021), "Increasing the accuracy of a marine diesel engine operation limit by thermal factor", *International Review of Mechanical Engineering (IREME)*, № 15 (3), P. 115 – 121. <https://doi.org/10.15866/ireme.v15i3.20865>
9. Sugianto, D., Zainuri, M., Darari, A., Suripin, Darsono S., Yuwono, N. (2017), "Wave height forecasting using measurement wind speed distribution equation in Java Sea, Indonesia", *International Journal of Civil Engineering and Technology*, № 8 (5), P. 604 – 619.
10. Aroucha, L., Duarte, H., Droguett, E., Veleda, D. (2018), "Practical aspects of meteorology and oceanography for mariners: A guide for the perplexed", *Cogent Engineering*, № 5(1), P. 1 – 23. <https://doi.org/10.1080/23311916.2018.1492314>
11. Gorb, S. I., Sandler, A. K., Budurov, N. I. (2019), "Increasing of the main engine efficiency by propeller thrust correction", *Automation of Marine Technical Equipment: Sc.-Tech. Art.* ["Povyshenie effektivnosti raboty glavnogo dvigatelya korrekcirovkoy upora grebnogo vinta", *Avtomatizatsiya sudovykh tekhnicheskikh sredstv: nauch.-tekhn. sb.*], Odessa: NU "OMA", № 25, P. 35 – 52. <https://doi.org/10.31653/1819-3293-2019-1-25-35-52>
12. Gorb, S. I. (2019), "Optimization of the main engine on the vessel economy speed", *Automation of Marine Technical Equipment: Sc.-Tech. Art.* ["Optimizatsiya glavnogo dvigatelya na rezhime ekonomicheskogo khoda sudna", *Avtomatizatsiya sudovykh tekhnicheskikh sredstv: nauch.-tekhn. sb.*], Odessa: NU "OMA", № 25, P. 17 – 34. <https://doi.org/10.31653/1819-3293-2019-1-25-17-34>
13. Gorb, S. I., Budurov, N. I. (2021), "Optimization of an automatic control speed of a marine diesel engine", *Automation of Marine Technical Equipment: Sc.-Tech. Art.* ["Optimizatsiya avtomaticheskogo regulirovaniya chastoty vrashcheniya sudovogo dizelya"], № 27, Odessa: NU "OMA", P. 3 – 21. <https://doi.org/10.31653/1819-3293-2021-1-27-03-21>
14. Mei, Q., Naruemon, I., Liu, L., Wu, Y., Ma, X. (2023), "Numerical investigation on the combustion and emission characteristics of diesel engine with flexible fuel injection", *Machines*, № 11 (120), 21 p. <https://doi.org/10.3390/machines11010120>
15. Milasinovic, A., Filipovic, I., Milovanovic, Z., Knezević, D. (2011), "Determination of the engine torque of a four cylinder four stroke diesel engine on the basis of harmonic analysis of the crankshaft angular velocity", *Transactions of FAMENA*, № 35, P. 55 – 65.
16. Zhong, L., Singh, I., Han, J., Lai, M., Henein, N., Bryzik, W. (2003), "Effect of cycle-to-cycle variation in the injection pressure in a common rail diesel injection system on engine performance", *SAE Technical Paper*, № 2003-01-0699, 12 p. <https://doi.org/10.4271/2003-01-0699>
17. Kyrtatos P., Hoyer, K., Obrecht, P., Boulouchos, K. (2013), "Apparent effects of in-cylinder pressure oscillations and cycle-to-cycle variability on heat release rate and soot concentration under long ignition delay conditions in diesel engines", *International Journal of Engine Research*, № 15 (3), P. 325 – 327. <https://doi.org/10.1177/1468087413483288>
18. Sigmund, S., Moc-tar, O. (2017), "Numerical and experimental investigation of propulsion in waves", *Ocean Engineering*, № 144, P. 35 – 49. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2017.08.016>
19. Cardoso, D., Fael, P., Gaspar, P., Espirito-Santo, A. (2024), "An Innovative Mechanical Approach to Mitigating Torque Fluctuations in IC Engines during Idle Operation", *Designs*, № 8 (47), 20 p. <https://doi.org/10.3390/designs8030047>
20. Shop Test Result for Main Engine HYUNDAI-MAN B&W 6S60MC-C7: № K630-IR11A-5984. (2011), HHI-EMD, 18 p.
21. Gorb, S., Levinskyi, M., Budurov, M. (2021), "Sensitivity optimisation of a main marine diesel engine electronic speed governor", *Scientific Horizons*, № 24 (11), P. 9 – 19. [https://doi.org/10.48077/scihor.24\(11\).2021.9-19](https://doi.org/10.48077/scihor.24(11).2021.9-19)
22. Kazienko, D., Chybowski, L. (2020), Instantaneous Rotational Speed Algorithm for Locating Malfunctions in Marine Diesel Engines, *Energies*, № 13 (6), P. 1 – 31. <https://doi.org/10.3390/en13061396>
23. Tsitsilonis K., Theotokatos G. (2021), "A novel method for in-cylinder pressure prediction using the engine instantaneous crankshaft torque", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M*, № 236 (1), P. 131 – 149. <https://doi.org/10.1177/14750902211028419>
24. Gorb, S. I. (2020), "Improving the accuracy of numerical simulation of the working process of diesel engine", *Automation of Marine Technical Equipment: Sc.-Tech. Art.* ["Povyshenie tochnosti chislennogo modelirovaniya rabochikh protsessov dizelyey", *Avtomatizatsiya sudovykh tekhnicheskikh sredstv: nauch.-tekhn. sb.*], Odessa: NU "OMA", № 26, P. 3 – 26. <https://doi.org/10.31653/1819-3293-2020-1-26-03-26>
25. Usov, A., Slobodianiuk, M., Nikolskiy, M. (2021), "Determination of optimal control of a vessel diesel engine during non-stationary traffic regimes", *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, № 6, P. 136 – 146. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.248960>
26. Lünser, H., Hartmann, M., Desmars, N., Behrendt, J., Hoffmann, N., Klein, M. (2022), "The Influence of Characteristic Sea State Parameters on the Accuracy of Irregular Wave Field Simulations of Different Complexity", *Fluids*, № 7 (7), P. 1 – 18. <https://doi.org/10.3390/fluids7070243>
27. Karaky, H., Mauviot, G., Tauzia, X., Maiboom, A. (2015), "Development and Validation of a New Zero-Dimensional Semi-Physical NOx Emission Model for a D.I. Diesel Engine Using Simulated Combustion Process", *SAE International Journal of Engines*, № 8 (4), P. 1924 – 1937. <https://doi.org/10.4271/2015-01-1746>
28. Gorb, S., Popovskii, A., Budurov, M. (2023), "Adjustment of the speed governor for a marine diesel generator engine", *International Journal of GEOMATE*, № 25 (109), P. 125 – 132. <https://doi.org/10.21660/2023.109.m2312>

Надійшла до редакції 21.03.2025 р.

Будуров Микола Ігорович – здобувач ступеня доктора філософії в Національному університеті «Одеська морська академія», Одеса, Україна, e-mail: budurovuk@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-3634-306X>

OPTIMIZATION OF ELECTRONIC SPEED GOVERNOR FOR MARINE DIESEL ENGINE

M. I. Budurov

The automatic speed control system (ASCS) is crucial for ensuring the stable operation of diesel engines, which are the most common prime movers on merchant fleet. Modern diesel installations are equipped with electronic speed governors (ESG) that can be adjusted upon changeable ship's sailing conditions. However, in practice, governor parameters are typically set for a specific mode without considering the stochastic nature of external sailing conditions, leading to unsatisfactory speed regulation in other modes. This creates a problem of ensuring the optimal operation of the ASCS with ESGs during vessel's operation, especially in rough weather conditions. In this regard, the study aims to optimize the adjustment ESG's parameters, taking into account the stochastic nature of the load across the entire range of possible operational modes of marine diesel engine. The research methodology involves the use of numerical and mathematical modeling, allowing for the consideration of stochastic characteristics of disturbances caused by the propeller, fluctuations in gas pressure in the diesel cylinders, the dynamic properties of ESG components, and ASCS nonlinearities. The methodology was tested on the main diesel installation HYUNDAI-MAN B&W 6S60MC-C7 of the CATALAN SEA tanker under various operational modes and changing sailing conditions over a wide range. As a result of the study, optimal settings for the Nabtesco MG-800 electronic governor were determined based on the criterion of minimizing the

amplitude instability of crankshaft speed oscillations while maintaining an acceptable level of thermal regime stability. This optimization improved diesel engine stability and reduced specific effective fuel consumption by 1.5 – 4.3 % in main operational modes. The recommendations presented in this work regarding ESG adjustment can be used in the operation of marine diesel engines to enhance their stability.

Key words: marine diesel engine; indicator torque; speed stability; speed governor; sea disturbance.

УДК 629.5:621.436

DOI: 10.20998/0419-8719.2025.1.06

Б. Г. Тимошевський, М. Р. Ткач, О. М. Попов

МОТОРНІ ВЛАСТИВОСТІ АЛЬТЕРНАТИВНИХ ПАЛИВ, ОТРИМАНИХ ШЛЯХОМ ПЕРЕРОБКИ ПОЛІМЕРНИХ ВІДХОДІВ

Основною метою роботи є оцінка ефективності раціональної технології переробки термопластичних полімерних відходів у моторні палива. Впровадження такої технології дозволить залучити до енергетичного балансу певну кількість ресурсів, які не застосовувалися раніш, а також утилізувати зазначені відходи достатньо екологічним засобом. На теперішній час впровадження альтернативних моторних палив є одним з шляхів вирішення проблеми забезпечення енергетичними ресурсами транспорту та стаціонарної енергетики. Однією з можливих видів сировини є відходи термопластичних полімерів. Ця сировина має декілька суттєвих переваг перед нафтою: практична відсутність сірки, ванадію, важких вуглеводнів, смол, нафтових кислот та низькі інші небажані компоненти. Розглянуто основні моторні властивості альтернативних палив, отриманих з відходів переробки термопластичних полімерів. Встановлено, що шляхом вибору раціональної схеми технологічного процесу переробки, очищення можна отримати бензинове, дизельне, важке дизельне та котельне паливо. Встановлено, що шляхом вибору раціональних параметрів процесу переробки можна налаштовувати обладнання з метою отримання переважної кількості певного продукту. Показано, що їх техніко-хімічні властивості дозволяють використовувати ці палива в теплових двигунах без суттєвих змін двигуна та паливної системи. Наведено принципову технологічну схему процесу отримання альтернативного палива з пластикових відходів, основні моторні властивості та вихід товарного палива. Визначено, що властивості такого альтернативного палива за відповідних технологічних параметрів можуть бути дуже близькими до стандартних палив. Індикаторні діаграми наведені для двигуна 6ЧН12/14 при роботі на стандартному та альтернативному дизельному паливі. Визначені рівні тиску в циліндрі двигуна, питома ефективна витрата палива, вміст монооксиду вуглецю (CO) та оксидів азоту (NO_x) у випускних газах, а також швидкість зростання тиску $dP/d\phi$ в циліндрі при роботі на конвенційному дизельному паливі по ДСТУ 7688:2015 та альтернативному паливі. Показано, що використання зазначеного альтернативного палива не потребує суттєвих змін в конструкції двигуна та для досягнення прийнятних показників можна обмежитися відповідним налаштуванням паливної апаратури. Тому, на наш погляд, можна сподіватися на достатньо ефективне використання такого палива з енергетичної та екологічної точки зору.

Ключові слова: технологічний процес; моторні властивості; альтернативні види палива; відходи термопластичних полімерів; теплові двигуни; індикаторна діаграма.

Вступ

Залучення до енергетики нових альтернативних енергоресурсів є надзвичайно актуальною проблемою для ефективного функціонування економіки. Особливо важливим є використання альтернативних енергоресурсів та їх диверсифікація в умовах нестабільності цін на нафтові палива, виснаження запасів вуглеводневої сировини та політичної кон'юнктури. Одним з перспективних енергоресурсів є альтернативні моторні палива, які можуть бути отримані з відходів термопластичних полімерних матеріалів.

На теперішній час світове співтовариство накопичило більше 8 млрд. т полімерних відходів, стан яких не дозволяє використовувати їх для виробництва вторинних полімерних товарів. Нажаль кількість таких відходів з кожним роком збільшується приблизно на 150 млн. т. Забруднення відходами поліме-

рів спостерігається не тільки на суходолі, а вже поширилося й на Світовий океан. З іншого боку полімерні відходи уявляють собою вуглеводневу сировину, яка може бути використана для виробництва альтернативних моторних палив.

При використанні ефективних та екологічно безпечних технологій виробництво альтернативних моторних палив (бензинів, дизельних та мазутів) з полімерних відходів може забезпечити до 5...7% світового споживання рідких моторних палив. Одночасно вирішується інша важлива проблема – зниження навантаження на довкілля шляхом утилізації цих відходів, які дуже стійкі до впливу природних чинників та не розкладаються сотні років.

Таким чином дослідження в галузі виробництва моторних палив з відходів термопластичних полімерів та одночасна утилізація цих відходів є акту-