

УДК 621.431.74

DOI: 10.31653/1819-3293-2025-1-29-03-20

ARTICLE HISTORY

Received 11.04.2025

Accepted 07.05.2025

Будуров Микола Ігорович
Національний університет "Одеська морська академія", Одеса,
Україна
budurovuk@gmail.com

Оптимізація електронного регулятора частоти обертання головного дизеля

Budurov Mykola
National University "Odessa Maritime Academy", Odessa, Ukraine
budurovuk@gmail.com

Optimization of electronic speed governor for main diesel engine

Резюме – Обґрунтовано методику налаштування електронного регулятора частоти обертання головного суднового дизеля, яка враховує особливості навантаження на дизель під час хвилювання моря. За рахунок оптимізації параметрів налаштування регулятора, у тому числі його чутливості до розбалансу сигналів, отримано покращення стабільності частоти обертання при найімовірніших в експлуатації судна впливах, що обурюють. Запропоновано підхід адаптивного регулювання частоти обертання головного дизеля, який забезпечує задовільну стабільність швидкісного режиму дизеля під час хитаєвості судна.

Abstract – A methodology for tuning the electronic speed governor of the main marine diesel engine has been substantiated, which takes into account the specific characteristics of diesel loading during sea disturbance. Through optimization of the governor tuning parameters, including its sensitivity to signal imbalance, improved rotational speed stability has been achieved under the most probable disturbing influences encountered during vessel operation. An adaptive approach to main diesel engine speed control

has been proposed, which ensures satisfactory stability of the diesel engine speed regime during vessel pitching.

Суднові дизелі є основним типом теплових двигунів, що застосовуються у складі енергетичних установок морського транспорту, забезпечуючи близько 97 % загальної кількості силових агрегатів [1]. Останнім часом електронні регулятори частоти обертання (РЧО) у складі головних двигунів (ГД) морських суден набули широкого розповсюдження. Проте на практиці постійно спостерігаються проблеми забезпечення якості регулювання, пов'язані із залежністю характеристик роботи електронного регулятора від режиму дизеля під час хвилювання моря. Як наслідок, для забезпечення задовільного регулювання обирається одна з двох стратегій:

1) під час зміни режимів роботи дизеля судновий персонал переналаштовує електронний регулятор з використанням візуальної оцінки стабільності частоти обертання, що ускладнює його обслуговування порівняно з гідравлічними регуляторами;

2) у разі незадовільного регулювання в умовах хитавиці судновий персонал зменшує швидкість ходу судна, що призводить до погіршення економічних показників роботи судна.

Таким чином, актуальною проблемою є підвищення ефективності автоматичного регулювання частоти обертання ГД з електронними регуляторами частоти обертання у всьому діапазоні експлуатаційних режимів, для яких характерним є хвилювання моря.

У сучасній практиці експлуатації суднових дизелів усталеною вважається методика налаштування регуляторів частоти обертання в умовах ступінчастих змін навантаження [2]. Однак у ГД обурення не можуть змінюватися ступенево як за каналом завдання частоти обертання, так і за каналом навантаження. Пояснюється це тим, що по каналу завдання сигнал навмисно уповільнюється системою дистанційного автоматизованого управління при його збільшенні, щоб не виникало неповного згоряння палива та не прогоряли випускні клапани, а також щоб не забруднювався газовий тракт. У гідравлічних РЧО додатковий захист від різкої зміни завдання забезпечує сопло перед сильфоном, в електронних РЧО – спеціальна інтегруюча ланка. По каналу навантаження обурення також не може змінитися миттєво, оскільки навіть на судах з гвинтами, крок яких регульований, лопаті гвинта розгортаються досить повільно.

У свою чергу, особливістю головних суднових дизелів морських суден є робота в умовах хвилювання моря, коли амплітуди та періоди зміни навантаження на дизель залежать від розмірностей, швидкості та

рискування судна, бальності моря та курсового кута судна по відношенню до напрямку хвиль та вітру, тобто є стохастичними. Як наслідок, якщо оптимізувати роботу САРЧ за конкретних детермінованих, а не випадкових збуреннях, це може призвести до погіршення стабільності швидкісного режиму дизеля при зміні умов плавання.

Тому традиційна методика налаштування РЧО не забезпечує стабільність роботи САРЧ у широкому діапазоні можливих експлуатаційних режимів роботи головних дизелів суден, динамічні режими яких пов'язані насамперед із хвилюванням моря.

У зв'язку з викладеним метою роботи є забезпечення якісної роботи на всіх експлуатаційних режимах головного дизеля без періодичного ручного переналаштування регуляторів і без зниження швидкості ходу судна через погіршення роботи регуляторів.

Для оптимізації параметрів електронного РЧО може використовуватися математичне моделювання, яке потребує менших ресурсів для проведення експерименту та дозволяє уникнути спотворення отриманих результатів випадковими факторами. Розрахунки проводилися з урахуванням результатів роботи [3], у якій обґрунтована коректність припущень про стаціонарність характеру збурюючого впливу на судову дизельну установку під час хвилювання моря та нормальність функції густини розподілу ймовірності, зокрема через те, що досліджувана система містить лінійні інерційні ланки, які фактично є фільтрами негауссовості закону розподілу випадкових сигналів. Із цієї роботи також запозичені кількісні залежності змін дисперсії збурюючого впливу D_λ від бальності вітру за шкалою Бофорта та взаємозв'язок параметрів α і β ($\alpha \approx 0,16\beta$), що характеризують ступінь загасання та середню частоту кореляційної функції збурюючого впливу. Спектральну густину збурюючого впливу рекомендовано задавати таким чином, щоб вона мала найменшу густину потужності на низьких частотах [4]. У зв'язку з цим для моделювання використовувалося її наближення відповідною поліноміальною функцією [5]:

$$S_\lambda(\omega) = D_\lambda \frac{\frac{4\alpha}{\pi\beta^2} \cdot \left[0,5 \cdot \left(\frac{\omega^2}{\beta^2} + \frac{\alpha^2}{\beta^2} + 1 \right) \right]}{\frac{\omega^4}{\beta^4} + 2 \frac{\omega^2}{\beta^2} \cdot \left(\frac{\alpha^2}{\beta^2} - 1 \right) + \left(\frac{\alpha^2}{\beta^2} + 1 \right)^2},$$

де D_λ – дисперсія збурюючого впливу, відн. од.; α – ступінь загасання кореляційної функції збурюючого впливу, с^{-1} ; β – середня частота кореляційної функції збурюючого впливу, рад/с .

Наприклад, для сили вітру 4 бали за шкалою Бофорта та попутного напрямку хвиль відносно корпусу судна ($\alpha = 0,1 \text{ с}^{-1}$; $\beta = 0,016 \text{ рад/с}$; $D_\lambda = 0,0015$ відн. од.) формула спектральної густини матиме вигляд:

$$S_\lambda(\omega) = A \frac{\omega^2 + \gamma}{\omega^4 + \delta_1 \cdot \omega^2 + \delta_2},$$

де $A = 0,095 \cdot 10^{-3}$; $\gamma = 10,25 \cdot 10^{-3}$; $\delta_1 = 19,5 \cdot 10^{-3}$; $\delta_2 = 0,105 \cdot 10^{-3}$ – параметри формуючого фільтра, відн. од.

Випадковий сигнал із такою спектральною густиною формується за допомогою джерела псевдобілого шуму, вихід якого підключений до лінійної інерційної ланки з передатною функцією фільтра:

$$W_\lambda(s) = k \cdot \frac{s + b_1}{s^2 + a_1 \cdot s + a_2},$$

де a_1 – коефіцієнт часу релаксації, відн. од.; $k \cdot (b_1/a_2)$ – загальний коефіцієнт підсилення фільтра, відн. од.

Врахуємо, що на вхід ланки надходить псевдобілий шум з одиничним (у певному діапазоні частот) значенням спектральної густини:

$$|W_\lambda(j\omega)|^2 = k^2 \cdot \frac{\omega^2 + b_1^2}{\omega^4 + (a_1^2 - 2 \cdot a_2) \cdot \omega^2 + a_2^2}.$$

Порівняючи з виразом для спектральної густини моделі випадкового вхідного збурення, можемо отримати числові значення параметрів фільтра: $k - \sqrt{A} \approx 0,00975$ відн. од.; $b_1 - \sqrt{\gamma} \approx 0,1012$ відн.

од.; $a_1 - \sqrt{\delta_1 + 2\sqrt{\delta_2}} = 0,2$ відн. од.; $a_2 - \sqrt{\delta_2} = 0,0102$ відн. од.

Отже, передатна функція формуючого фільтра матиме вигляд:

$$W(s) = 0,00975 \cdot \frac{s + 0,1012}{s^2 + 0,2s + 0,0102}.$$

Для моделювання використана модель системи автоматичного регулювання частоти обертання (САРЧ) суднового дизеля HYUNDAI MAN B&W 6S60MC-C7 з електронним регулятором NABTESCO MG-800 та з урахуванням циклової нестабільності крутного моменту [6]. Модель дозволяє проаналізувати вплив параметрів налаштування РЧО на динамічні властивості САРЧ дизеля та враховує запізнення у каналі передачі керуючого впливу від регулятора до дизеля (через циклічність

подачі палива і особливостей зміни крутного моменту в кривошипно-шатунному механізмі).

На рис. 1 наведена структурна схема САРЧ суднового дизеля HYUNDAI-MAN B&W 6S60MC-C7 з електронним регулятором Nabtesco MG-800 та блоком обліку циклічності роботи дизеля, який відтворює циклову нестабільність крутного моменту. У електронному регуляторі NABTESCO MG-800 конструктивно замість "жорсткої зони нечутливості" (коли регулятор взагалі не реагує на зміну вхідного сигналу) зменшується коефіцієнт передачі сигналу k_g , відн. од., та/або змінюється ширина зони – ε , відн. од. 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 k_g прийнято рівним 0,5 відн. од., а вплив ширини зони при різній інтенсивності та періодах хвилювання моря досліджувався шляхом зміни ширини ЗПЧ. 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-диференціюючим (ПІД) законом регулювання. ВМ має два зворотні зв'язки (ЗЗ): 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. ЗЗ із ланкою 21 використовується у разі забезпечення паралельної роботи дизелів. Оскільки метою моделювання є покращення динаміки регулятора при збуреннях, близьких до гармонійних, прийняте спрощення у структурній схемі виключає врахування обмеження допустимого ходу ВМ: як функції від виміряної частоти обертання; як функції від тиску повітря наддування та жорстко встановленого на пульті керування. На рис. 2 запропонована стохастична модель САРЧ суднового дизеля HYUNDAI MAN B&W 6S60MC-C7 з електронним регулятором NABTESCO MG-800 та блоком обліку циклічності роботи дизеля.

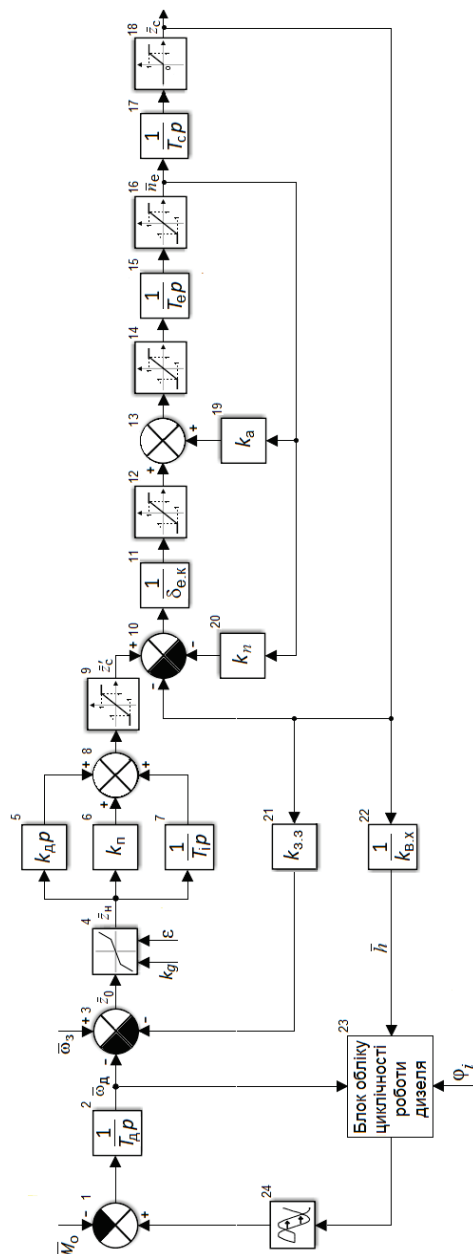


Рис. 1. Структурна схема САРЧ суднового дизеля HYUNDAI-MAN B&W 6S60MC-C7 з електронним РЧО Nabtesco MG-800: 1, 3, 8, 10, 13 – суматори; 2, 7, 15, 17 – інтегруючі ланки; 4 – функціональний перетворювач, який вводить ЗПЧ; 5 – диференціююча ланка; 6, 11, 19, 20, 21, 22 – пропорційні ланки; 9, 12, 14, 16 – 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, що враховує запізнення зміни відносного індикаторного моменту дизеля щодо зміни відносного ходу рейки паливних насосів

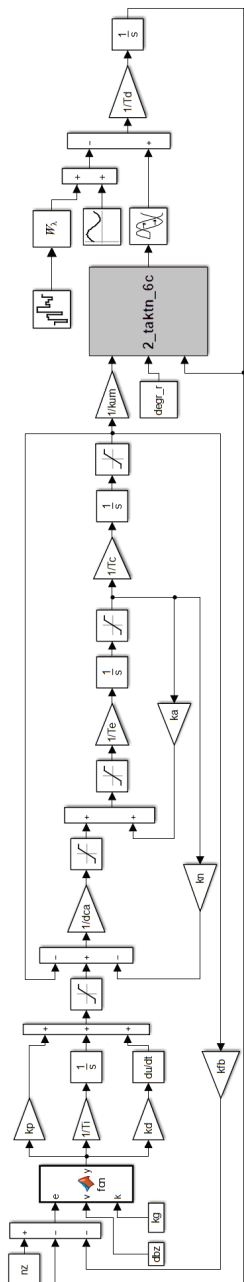


Рис. 2. Стохастична модель CAPC суднового дизеля HYUNDAI-MAN B&W 6S60MC-C7 з електронним регулятором NABTESCO MG-800 та блоком обліку циклічності роботи дизеля

Використовувалися такі значення параметрів: час розгону дизеля $T_d = 2,3$ с; кут випередження упорскування палива $\varphi_i = -2,5$ град. повороту колінчастого валу; час запізнення τ_{del} , розрахований за формулою з [7], та для номінального режиму складає 0,024 с; відносна ширина ЗПЧ $\varepsilon = 0 \dots 0,08$ 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 ЗЗ 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 ЗЗ $k_{fb} = 0$ відн. од.

Моделювання проводилося при базових (реально встановлених на пульті управління) налаштуваннях електронного РЧО: $k_p = 2,2$ відн. од.; $T_i = 2,0$ с; $\varepsilon = 0,005$ відн. од.; $k_n = 0,06$ відн. од.; $k_a = 0,3$ відн. од. Для зменшення впливу обмежень подачі палива на динаміку САРЧ, моделювання виконувалося за середнього навантаження на двигун 90 % від номінального.

Порівняння зміни відносного моменту опору та відносної частоти обертання валу суднової дизельної установки при трьох середніх періодах коливань обурюючого впливу $T_0 = 3,3; 7,9$ і $20,9$ с представлені на рис. 3.

Адекватність стохастичної математичної моделі оцінена для суднової дизельної енергетичної установки HYUNDAI MAN B&W 6S60MC-C7 танкеру "CATALAN SEA". У табл. 1 наведено порівняння експериментальних і розрахункових значень середньоквадратичного відхилення (СКВ) відносної частоти обертання валу $\sqrt{D_n}$ за різних умов плавання. Експериментальні значення параметрів розраховані на основі реалізації моменту скручування, частоти обертання гребного валу та ходу рейки паливних насосів.

Із табл. 1 видно, що СКВ розрахункових значень від експериментальних становить 10,1 %, що свідчить про адекватність розробленої моделі.

Відповідно до [9] для оптимізації параметрів налаштування РЧО при найімовірніших в експлуатації ГД амплітуді та частоті збурюючого впливу використано значення $\delta_\lambda = 0,12$ відн. од.

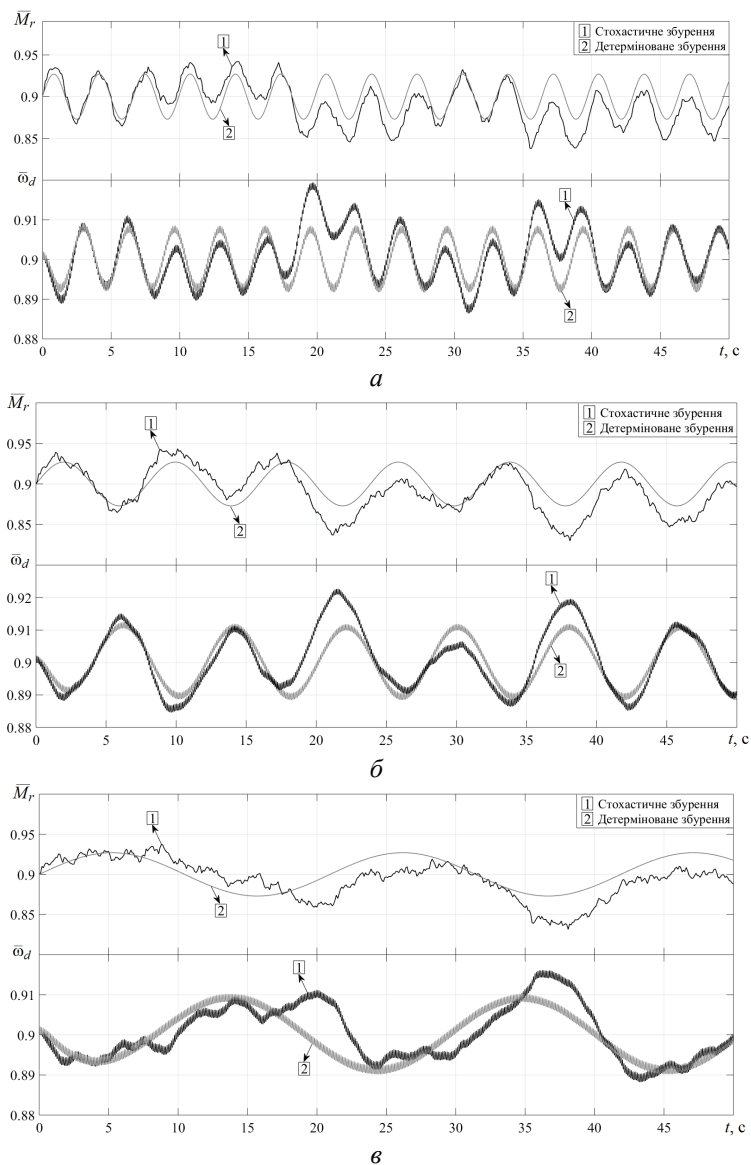


Рис. 3. Порівняння дії стохастичного та детермінованого синусоїдального збурення на дизельну установку при середньому періоді коливань обурюючого впливу T_0 : *a* – 3,3 с; *б* – 7,9 с; *в* – 20,9 с

Таблиця 1

Експериментальні та розрахункові значення ГД HYUNDAI MAN B&W 6S60MC-C7 танкера "CATALAN SEA" за різних умов плавання

Сила вітру, бали	Зиб, м	Напрямок хвиль відносно корпусу судна	Експериментальне значення $\bar{\omega}_d$	Експериментальні параметри, що характеризують збурення дизельної установки			СКВ відносної частоти обертання дизеля	
				$\alpha, \text{с}^{-1}$	$\beta, \text{рад/с}$	$D_\lambda, \text{відн. од.}$	експеримент	розрахунок
4	2		0,90	0,092	0,368	0,00195	0,014	0,010
6	1		0,90	0,115	0,419	0,00209	0,0095	0,0069
5	3		0,93	0,149	0,795	0,00128	0,0077	0,0086
4	–		0,87	0,088	0,608	0,00236	0,0109	0,0128
5	2,5		0,94	0,187	1,657	0,00290	0,0046	0,0031
7	2		0,90	0,215	1,013	0,00274	0,0042	0,0049
6	–		0,92	0,194	0,671	0,00249	0,0145	0,0152
8	4		0,89	0,229	0,506	0,215	0,0098	0,0061

При цьому враховано, що чим менше задана частота обертання дизеля, тим з меншою амплітудою коливатиметься момент опору гребного гвинта. У першому наближенні для цього використано статичну гвинтову залежність. Як критерій оптимальності обраний мінімум нестабільності параметра регулювання, тобто СКВ відносної частоти обертання валу дизеля – $\sqrt{D_n}$, відн. од. Цей мінімум повинен досягатися, перш за все, при найбільш імовірних значеннях амплітуди – δ_λ , відн. од., та середнього періоду коливань – T_0 , с, збурюючого впливу.

На рис. 4 порівняно перехідні процеси в САРЧ при базових значеннях параметрів налаштування електронного РЧО та оптимізованих: $k_p = 2,8$ відн. од.; $T_i = 1,5$ с; $\varepsilon = 0,05$ відн. од.; $k_n = 0,09$ відн. од.; $k_a = 0,6$ відн. од.

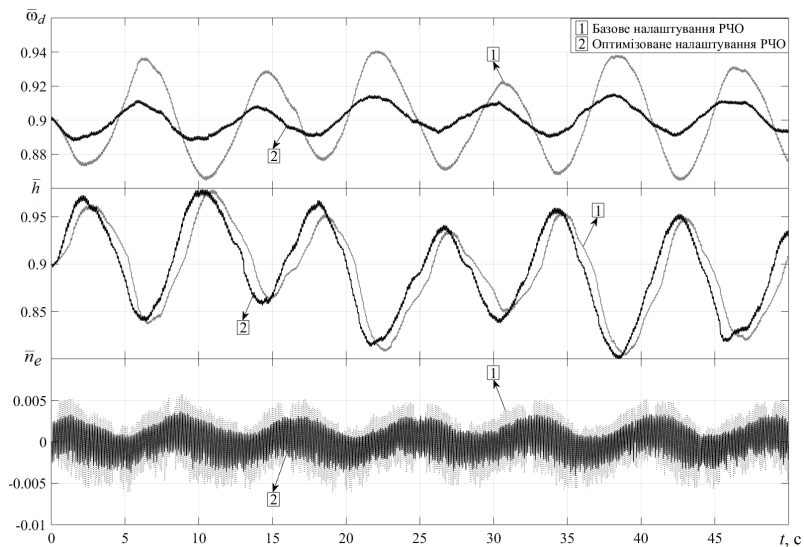


Рис. 4. Реакція системи на зовнішній обурюючий вплив при $\delta_\lambda = 0,12$ відн. од. та $T_0 = 7,9$ с

На рис. 4 результати отримані при $\delta_\lambda = 0,12$ відн. од. та $T_0 = 7,9$ с, проте у досить широкому діапазоні зміни δ_λ та T_0 оптимізовані значення параметрів регулятора забезпечили аналогічний ефект.

Налаштування РЧО істотно впливає на стабільність швидкісного та теплового режимів суднового дизеля, причому характер цього впливу за різних періодів і інтенсивності збурень є неоднозначним і в окремих випадках призводить до виникнення перерегулювання в САРЧ. Тому у ГД з гідравлічними регуляторами для забезпечення стабільної подачі палива на усталених режимах і/або незначному хвилюванні моря конструктивно визначена зона нечутливості. У реальних умовах роботи ГД під час хитавиці зона нечутливості регулятора практично не впливає на його роботу, регулятор "активно" змінює подачу палива, але при цьому швидкісний режим дизеля практично не стає стабільнішим. Фактично виникає нестабільність теплового режиму з тепловими перенавантаженнями двигуна, яка не супроводжується покращенням швидкісного режиму.

Для ГД з сучасними електронними РЧО оптимізація експлуатаційних режимів роботи дизелів за змінних умов плавання судна можлива на основі мікропроцесорної елементної бази, яка забезпечує реалізацію регулювання з перемінною структурою. У свою

чергу, якщо в електронних регуляторах ГД завищити величину ЗПЧ, то робота дизелів в умовах "штатного" хвилювання покращиться, але під час шторму регулятор не забезпечить нормальну стабільність швидкісного режиму дизеля, що безпосередньо пов'язано з життєздатністю судна. Це означає, що "жорстке" збільшення величини ЗПЧ регулятора є неприпустимим. У зв'язку з цим, пропонується підхід адаптивного регулювання частоти обертання головного дизеля, який забезпечує задовільну стабільність швидкісного режиму дизеля та враховує показники теплового режиму, під час хвитаці судна зі змінною амплітудою та періодом коливань шляхом адаптації величини ЗПЧ під стохастичні характеристики збурюючого впливу.

На рис. 5 зображений вплив пониженої чутливості електронного РЧО на СКВ відносної частоти обертання дизеля – $\sqrt{D_n}$, та СКВ відносного ходу рейки паливних насосів високого тиску (ПНВТ) – $\sqrt{D_h}$, за різної інтенсивності хвилювання (кількісно вираженої силою вітру за шкалою Бофорта). Результати отримані при трьох середніх періодах коливань обурюючого 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 $0,75$.

Із рис. 5, а та б, випливає, що при малому періоді коливання збурюючого впливу $T_0 = 3,3$ с зменшення чутливості (збільшення ширини ЗПЧ) в електронному РЧО підвищує стабільність як швидкісного, так і теплового режимів роботи ГД у всьому діапазоні вітрового хвилювання. Наприклад, під час хитавиці, яка викликана силою вітру 7 балів, для режиму $\bar{\omega}_d = 0,75$ при збільшенні ширини ЗПЧ з 0 до 0,08 відн. од. оцінка $\sqrt{D_n}$ зменшилася з 0,0219 до 0,0202 відн. од., а $\sqrt{D_h}$ зменшилася з 0,1092 до 0,0977 відн. од.

Таким чином, зменшення ширини ЗПЧ не приводить до поліпшення стабільності швидкісного режиму ($\sqrt{D_n}$ не зменшується) під час зміни навантаження на дизель у широкому діапазоні, тобто недоцільно збільшувати чутливість регулятора при малих відхиленнях параметра регулювання.

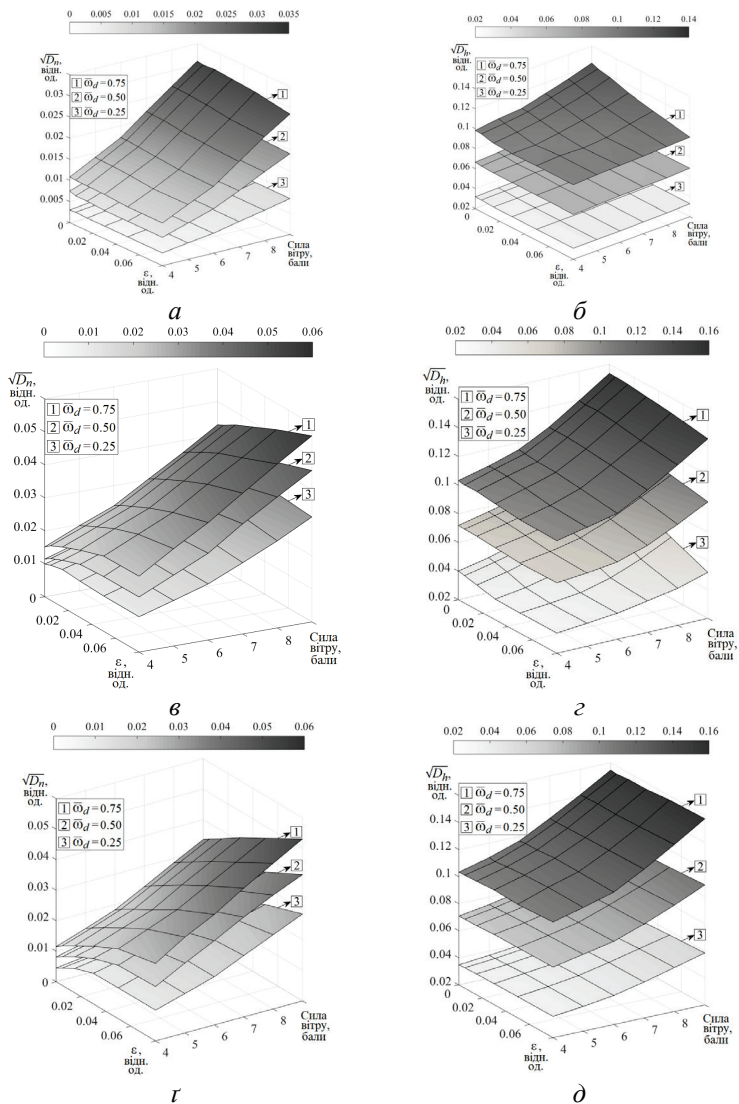


Рис. 5. Вплив пониженої чутливості електронного РЧО на $\sqrt{D_n}$ та $\sqrt{D_h}$ при зміні бальності вітру за шкалою Бофорта з періодом хвилювання моря: *a*, *б* – 3,3 с; *в*, *г* – 7,9 с; *д*, *е* – 20,9 с

У свою чергу, за рахунок зменшення чутливості РЧО при малому хвилюванні в експлуатаційних умовах спостерігається підвищення стабільності САРЧ та стабілізація теплового режиму роботи ГД, завдяки тому, що РЧО перестає надмірно реагувати на зміни навантаження на дизель (збурення з малою амплітудою).

Із рис. 5, *в* та *г*, випливає, що при середньому періоді $T_0 = 7,9$ с при зменшенні чутливості в електронному РЧО спостерігається незначна тенденція до стабілізації швидкісного режиму ($\sqrt{D_n}$ суттєво не змінюється) при малій інтенсивності хвилювання, а також покращення теплового режиму у всьому діапазоні вітрового хвилювання, у широкому діапазоні зміни навантаження на дизель. Наприклад, при хвилюванні моря, викликаному силою вітру 5 балів, на режимі $\bar{\omega}_d = 0,25$ у діапазоні ширини ЗПЧ $0 \dots 0,08$ відн. од. $\sqrt{D_n}$ стабілізується на рівні $0,013 \dots 0,014$ відн. од, а $\sqrt{D_h}$ зменшується з $0,0445$ до $0,036$ відн. од. При інтенсивному хвилюванні моря, яке викликає значні зміни частоти обертання дизеля (тобто при великій дисперсії збурюючого впливу) ширину ЗПЧ рекомендується задавати $0,01 \dots 0,025$ відн. од. для того, щоб РЧО більш "активно" регулював частоту обертання валу, одночасно стабілізуючи тепловий режим дизеля.

Із рис. 5, *г* та *д*, випливає, що при великому періоді коливання $T_0 = 20,9$ с зменшення чутливості РЧО як при помірному (викликаному силою вітру до 6 балів), так при інтенсивному хвилюванні (викликаному силою вітру 6 балів і вище), погіршує динаміку РЧО при зміні навантаження на дизель у широкому діапазоні, про що свідчить істотне збільшення оцінки $\sqrt{D_n}$. Наприклад, під час хвилювання моря, викликаного силою вітру 6 балів, на режимі $\bar{\omega}_d = 0,5$ при збільшенні ширини ЗПЧ з 0 до $0,08$ відн. од. $\sqrt{D_n}$ збільшилися з $0,0126$ до $0,0276$ відн. од. Схожа тенденція погіршення стабільності має і тепловий режим ГД: $\sqrt{D_h}$ збільшилися з $0,0792$ до $0,0815$ відн. од. Пояснюється це тим, що при зменшенні чутливості регулятор переміщує рейку ПНВТ із запізненням, але ривками, що не зменшує амплітуду її переміщення.

У табл. 2 приведені оптимальні налаштування пониженої чутливості електронного РЧО при різних середніх періодах коливаний та дисперсії збурюючого 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 2

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

$\bar{\omega}_d$	Сила вітру ε , відн. од.					
	при $T_0 = 3,3$ с		при $T_0 = 7,9$ с		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

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. 5 а, б);

при $T_0 = 7,9$ с при зменшенні чутливості РЧО (збільшенні ширини ЗПЧ), як за малої дисперсії збурюючого впливу, так і за хвилювання моря, що спричиняє інтенсивні та значні зміни частоти обертання дизеля, спостерігається вираж у стабільності теплового режиму (зменшення $\sqrt{D_h}$), при цьому суттєвого покращення стабільності швидкісного режиму не відбувається (рис. 5 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. 5 г, д).

На практиці часто трапляється, що під час помірного хвилювання моря регулятор надмірно реагує на періодичні зміни навантаження, що викликає нестабільність теплового режиму двигуна. Якщо зменшити швидкодію регулятора на періодичні зміни навантаження на дизель, наприклад, зменшенням коефіцієнта підсилення пропорційної ланки та/або збільшенням часу інтегрування, стабільність теплового режиму ГД покращиться, але при інтенсивному хвилюванні моря погіршиться стабільність швидкісного режиму, що неприпустимо.

У зв'язку з цим, на рис. 6 пропонується підхід до забезпечення стабільності швидкісного режиму ГД при хвилюванні моря різної інтенсивності шляхом адаптації ширини ЗПЧ регулятора під стохастичні характеристики збурення.

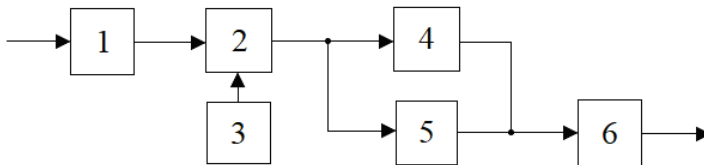


Рис. 6. Блок-схема для адаптації ширини ЗПЧ електронного регулятора ГД під стохастичні характеристики збурення: 1 – елемент обчислення модуля відхилення фактичної частоти обертання від заданої; 2 – елемент порівняння із заданим пороговим допустимим відхилення фактичної частоти обертання від заданої; 3 – елемент завдання порогового значення допустимого відхилення; 4 – елемент уповільнення сигналу; 5 – тригер; 6 – ланка ЗПЧ

Робота регулятора частоти обертання під час погіршення умов плавання переходить на режим "активнішого" регулювання частоти обертання. Для цього на елемент 1 надходить сигнал різниці між заданою та фактичною частотами обертання, скоригована на сигнал ЗЗ (у разі забезпечення статизму для можливості паралельної роботи ГД). За допомогою елемента 1 обчислюється модуль відхилення фактичної частоти обертання від заданої. Цей сигнал порівнюється за допомогою елемента 2 із заданим у блоці 3 пороговим допустимим відхилення фактичної частоти обертання від заданої, а саме 0,05 відн. од. У випадку, коли відхилення фактичної та заданої частоти обертання знаходиться у "допустимого порозі", за допомогою елемента уповільнення сигналу 4, який працює за інтегруючим або ступеневим позиційним законом, відбувається коригування ширини ЗПЧ ланки 6. Якщо заданий допуск не перевищується, то регулятор вибирає підвищену ширину ЗПЧ 0,03 відн. од., яка зменшує коливання рейки під час хитаєві судна. Якщо допуск під час хвиль із середньою інтенсивністю та періодом досягнув середини допустимого значення, система зменшує ширину ЗПЧ регулятора до 0,02 відн. од., що приводить до покращення швидкісного режиму та зменшенню теплових перенавантажень ГД. Якщо допуск підходить до верхньої границі під час хвилювання з великим періодом та/або інтенсивне або оператор змінив режим роботи головного дизеля, система зменшує

ширину ЗПЧ регулятора до 0,01 відн. од., що приводить до кращої роботи регулятора, завдяки більш "активнішій" реакції на збурення. У випадку перевищення допустимого порогу відхилення тригер 12 миттєво повертає ширину ЗПЧ до штатного значення.

Таким чином, виявлено закономірності впливу параметрів налаштування електронного РЧО на показники роботи суднової дизельної установки в умовах хвилювання моря. Ці закономірності, запропонована методика дослідження, а також підхід до забезпечення стабільності швидкісного режиму ГД при хвилюванні моря шляхом адаптації ширини ЗПЧ регулятора, дають змогу оптимізувати експлуатаційні режими головного дизеля у реальних умовах плавання.

Наступне дослідження планується в області обґрунтування вибору параметрів налаштування логічної частини електронних РЧО за допомогою яких найдоцільніше адаптувати експлуатаційні режими роботи суднових дизель-генераторів.

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

1. Sagin S., Haichenia O., Karianskyi S., Kuropyatnyk O., Razinkin R., Sagin A., Volkov O. Improving Green Shipping by Using Alternative Fuels in Ship Diesel Engines. // *Journal of Marine Science and Engineering*. – 2025. – Vol. 13. – 30 p.
2. Nielsen K., Blanke M., Eriksson L., Vejlgard-Laursen M. Marine diesel engine control to meet emission requirements and maintain maneuverability. // *Control Engineering Practice*. – 2018. – Vol. 76. – P. 12 – 21.
3. Gorb S., Levinskyi M., Budurov M. Sensitivity optimisation of a main marine diesel engine electronic speed governor. // *Scientific Horizons*. – 2021. – Vol. 24. – № 11. – P. 9 – 19.
4. Parunov J., Guedes Soares C., Hirdaris S., Wang X. Uncertainties in modelling the low-frequency wave-induced global loads in ships. // *Marine Structures*. – 2022. – Vol. 86. – 21 p.
5. Lünser H., Hartmann M., Desmars N., Behrendt J., Hoffmann N., Klein M. The Influence of Characteristic Sea State Parameters on the Accuracy of Irregular Wave Field Simulations of Different Complexity. // *Fluids*. – 2022. – Vol. 7. – № 7. – 18 p.
6. Budurov M., Gorb S., Popovskii A. Optimization of electronic speed governors sensitivity for marine diesel engines. // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – 2025. – Vol. 2. – № 8 (134). – P. 26 – 35.

7. Gorb S., Popovskii A., Budurov M. Adjustment of speed governor for marine diesel generator engine. // International Journal of GEOMATE. – 2023. – Vol. 25. – № 109. – P. 125 – 132.

8. Горб, С. І., Будуров, М. І. Оптимизация автоматического регулирования частоты вращения судового дизеля. // Автоматизація суднових технічних засобів: наук. -техн. зб. – 2021. – Вип. 27. – Одеса: НУ "ОМА". – С. 3 – 21.

Abstract. – Marine diesel engines are the primary type of heat engines used in marine transport power plants, providing approximately 97% of the total number of power units. However, in practice, marine main diesel engines with electronic speed governors constantly experience problems in ensuring control quality, related to the dependence of electronic governor operating characteristics on the diesel engine mode during sea disturbance. As a result, control quality becomes dependent on subjective actions of personnel.

In modern marine diesel engine operation practice, the methodology for tuning speed governors under conditions of stepwise load changes is considered established. However, a distinctive feature of main marine diesel engines on seagoing vessels is operation under sea disturbance conditions, when the amplitudes and periods of diesel load changes depend on vessel dimensions, speed and rolling, sea state and the vessel's course angle relative to wave and wind direction, i.e., they are stochastic. Therefore, the traditional methodology for tuning speed governors does not ensure adequate rotational speed stability at possible operational modes of main marine diesel engines.

A proposed model for automatic speed control of the HYUNDAI MAN B&W 6S60MC-C7 marine diesel engine of the tanker "CATALAN SEA" with NABTESCO MG-800 electronic governor is presented. The results of optimizing the electronic governor tuning parameters on the model provided improved control during sea disturbance of various intensities.

An adaptive approach to main diesel engine speed control under sea disturbance conditions is also proposed. Adaptation is ensured by changing the reduced sensitivity zone of the governor, which allows optimization of main diesel engine operational modes under real navigation conditions.