

СУДНОВОДІННЯ ТА ЕНЕРГЕТИКА СУДЕН

УДК 681.5:621.436

doi.org/10.33298/2226-8553.2025.3.44.01

© Панов С.Л., Ляшко О.В., Степух В.А., Пастух О.В.

АНАЛІЗ ДИНАМІКИ КОМБІНОВАНОЇ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ЧАСТОТИ ОБЕРТАННЯ ДИЗЕЛЬНОГО ДВИГУНА

У статті розглянуто актуальну задачу забезпечення стабільної частоти обертання валу дизельного двигуна в умовах різких змін механічного навантаження, характерних для роботи суднових енергетичних установок. Динамічна взаємодія навантаження з двигуном призводить до короточасних відхилень частоти обертання, що негативно позначається на стійкості роботи силового агрегату, рівномірності подачі палива та механічному навантаженні на вузли газорозподільного механізму (ГРМ) і кривошипно-шатунний механізм (КШМ). Традиційні системи автоматичного регулювання (САР) частоти обертання, засновані на зворотному зв'язку, мають обмежені можливості щодо швидкого компенсування таких збурень, що проявляється у значному провалі частоти та затримці відновлення сталого режиму.

Для підвищення динамічної стійкості розглянуто комбіновану систему регулювання, у якій до основного контуру додано випереджальний сигнал, що враховує характер прикладеного навантаження. На основі операторного опису елементів системи побудовано математичну модель та виконано чисельно-імітаційне моделювання реакції двигуна на зміну навантаження. Аналіз отриманих перехідних процесів дав змогу оцінити ключові динамічні показники: глибину провалу частоти, швидкодію, стійкість та здатність системи до демпфування механічних збурень.

Порівняння традиційної та комбінованої структур САР показало, що використання додаткового випереджального сигналу дозволяє зменшити відхилення частоти майже вдвічі та скоротити час відновлення до усталеного режиму. Отримані результати підтверджують ефективність комбінованого регулювання для підвищення надійності й механічної стійкості дизельних двигунів у перехідних режимах, що є важливим для суднових енергетичних комплексів.

Ключові слова: система автоматичного регулювання, дизельний двигун, частота обертання, комбінована САР, динамічні характеристики, провал частоти, чисельно-імітаційне моделювання.

Постановка проблеми. Дизельні двигуни, що застосовуються у складі суднових та стаціонарних дизель-генераторних установок, працюють в умовах значних та швидкоплинних змін навантаження [1-3]. Раптові стрибки споживаної електричної потужності призводять до миттєвого збільшення крутного моменту на валу та, як наслідок, до тимчасового зниження частоти обертання дизельного двигуна, що підтверджується експлуатаційними дослідженнями на енергетичних системах суден [4]. Глибина та тривалість такого провалу визначають якість електроенергетичних процесів на судні, впливають на роботу споживачів і можуть спричинити відхилення параметрів електропостачання за межі допустимих норм.

Традиційні системи автоматичного регулювання частоти обертання, що базуються на П- або ПІ-регуляторах з негативним зворотним зв'язком, забезпечують стабілізацію швидкості у сталому режимі, проте їхня здатність швидко компенсувати динамічні збурення є обмеженою. У випадку різкого накиду навантаження регулятор реагує із запізненням, оскільки коригуюча дія формується лише після появи відхилення частоти. Це призводить до суттєвого провалу частоти обертання та збільшення часу встановлення.

Слід зазначити, що підвищені вимоги до стабільності роботи дизель-генераторних установок на судах зумовлені широким спектром технологічних, експлуатаційних та екологічних чинників, що

характеризують сучасні транспортні системи [5-7]. Це підсилює потребу в удосконаленні систем автоматичного регулювання частоти обертання та зменшенні впливу перехідних режимів на роботу силових агрегатів.

Одним із перспективних підходів є використання комбінованих систем автоматичного регулювання (САР), у яких поряд із сигналом зворотного зв'язку застосовується додатковий випереджальний сигнал, пропорційний зміні навантаження. Така структура дозволяє зменшити інерційність регулювання та підвищити стійкість дизель-генераторної установки в перехідних режимах. Проте порівняльні дослідження ефективності комбінованих САР на основі строгих математичних моделей виконані недостатньо, що зумовлює актуальність даної роботи.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Системи автоматичного регулювання частоти обертання дизельних двигунів суднових енергетичних установок залишаються одним із ключових напрямів удосконалення суднової автоматики. У сучасних працях значну увагу приділено оптимізації параметрів електронних регуляторів частоти обертання з урахуванням динаміки навантаження, вимог класифікаційних товариств та особливостей експлуатації суднових дизелів. Зокрема, у роботі [8] запропоновано методику оптимізації налаштувань електронного регулятора частоти обертання на основі математичного та чисельного моделювання. Подібні підходи висвітлені у дослідженнях [9, 10], де проаналізовано чутливість та динаміку суднових регуляторів у різних режимах роботи дизеля.

Значний інтерес становлять роботи, присвячені моделюванню комплексних енергетичних систем суден, включно з взаємодією дизель-генераторів, турбокомпресорних агрегатів та систем автоматичного регулювання. У публікації [11] розглянуто моделювання суднової електроенергетичної установки у перехідних режимах, що підтверджує актуальність імітаційних методів для оцінювання динаміки суднових САР. Розвитку інтелектуальних методів і автоматизованого моделювання присвячено монографію [12], де підкреслено перспективність комп'ютерних засобів аналізу динамічних процесів.

У міжнародних дослідженнях активно розглядаються методи покращення динамічних характеристик дизелів за рахунок застосування робастного, оптимального та комбінованого керування. Так, у роботах [13-16] запропоновано моделі та регулятори, що використовують випереджальні сигнали (feedforward), H_2 -регулятори та методи активної компенсації збурень для підвищення швидкодії та зменшення впливу навантаження.

Водночас питання порівняльного аналізу динамічних властивостей комбінованих систем автоматичного регулювання частоти обертання дизельного двигуна, які включають додатковий сигнал по навантаженню, залишається недостатньо висвітленим, що визначає актуальність даного дослідження.

Метою статті є аналіз динамічних властивостей системи автоматичного регулювання частоти обертання дизельного двигуна та оцінювання ефективності комбінованої структури регулювання на основі математичного та чисельно-імітаційного моделювання перехідних процесів.

Виклад основного матеріалу та основні результати дослідження. Аналіз динамічних властивостей системи автоматичного регулювання (САР) полягав у дослідженні реакції дизельного двигуна на зміни завдання та збурення по навантаженню, визначенні характеру перехідних процесів, оцінюванні характеру перехідних процесів, величини перерегулювання та глибини провалу частоти обертання при раптовому накиді навантаження. Для цього було використано математичний опис елементів САР у вигляді передавальних функцій і побудовано замкнені моделі системи з традиційною та комбінованою структурами регулювання. Ефективність [17] комбінованої структури оцінювалась шляхом порівняння перехідних процесів при однакових збуреннях, визначаючи зменшення початкового провалу частоти, швидкість відновлення усталеного режиму та вплив додаткового сигналу на стабільність системи. Чисельно-імітаційне моделювання виконано із застосуванням сучасних комп'ютерних засобів математичного аналізу та розв'язування динамічних систем, подібно до підходів, наведених у [18-20].

Для аналізу роботи САР частоти обертання розглядається дизельний двигун у режимі малих відхилень від номінального режиму. Об'єктом регулювання є лінійна модель дизельного двигуна. Усі змінні подано у відносних одиницях та відлічуються від усталених значень. Лінеаризована динаміка двигуна у першо-порядковому наближенні описується диференціальним рівнянням:

$$T_0 \frac{dn(t)}{dt} + n(t) = k_N (h(t) - N(t)), \quad (1)$$

де T_0 – еквівалентна постійна часу дизеля, с;

$n(t)$ – відхилення частоти обертання вала, в.о.

k_N – коефіцієнт передачі каналу «подача палива - частота обертання»;

$h(t)$ – відхилення керувальної дії (положення рейки паливного насосу високого тиску), в.о.;

$N(t)$ – відхилення механічного навантаження на вал (момент генератора), в.о.

Після перетворення Лапласа передавальна функція об'єкта:

$$P(s) = \frac{n(s)}{h(s)-N(s)} = \frac{k_N}{T_0 s + 1}. \quad (2)$$

Модель ПІ-регулятора частоти обертання. Помилка регулювання визначається як:

$$e(t) = n_{зд}(t) - n(t) \quad (3)$$

де $n_{зд}(t)$ – задане значення частоти, в.о.

Закон ПІ-регулювання має вигляд:

$$h_p(t) = k_p e(t) + k_i \int_0^t e(\tau) d\tau \quad (4)$$

де k_p – пропорційний коефіцієнт;

$k_i = k_p / T_i$ – інтегральний коефіцієнт, с⁻¹;

T_i – постійна часу інтегрування, с.

Передавальна функція ПІ-регулятора в операторній формі:

$$C(s) = \frac{h_p(s)}{e(s)} = k_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right). \quad (5)$$

Канал додаткового випереджального сигналу за навантаженням:

$$W_k(s) = \frac{h_d(s)}{N(s)} = \frac{k_k}{T_k s + 1}, \quad (7)$$

де k_k – коефіцієнт підсилення додаткового випереджального сигналу;

T_k – постійна часу фільтрації сигналу навантаження, с.

Загальна керувальна дія формується як:

$$h(t) = h_p(t) + h_d(t), \quad (8)$$

Передавальні функції замкненої САР:

– канал завдання (для обох систем):

$$G_{ref}(s) = \frac{n(s)}{n_{зд}(s)} = \frac{P(s)C(s)}{1+P(s)C(s)}; \quad (9)$$

– канал збурення (традиційна САР):

$$G_Q(s) = \frac{n(s)}{Q(s)} = -\frac{P(s)}{1+P(s)C(s)}, \quad (10)$$

де $Q(s)$ – зображення навантаження $N(s)$, в.о.;

– канал збурення (комбінована САР):

$$G_{Q,comb}(s) = \frac{n(s)}{Q(s)} = \frac{P(s)(W_k(s)-1)}{1+P(s)C(s)}. \quad (11)$$

Рівняння (1)-(11) формують замкнену математичну модель САР частоти обертання дизельного двигуна, що включає об'єкт регулювання, регулятор та додатковий випереджальний канал.

Чисельно-імітаційне моделювання проводилось при наступних параметрах:

$T_0 = 1.7$ с; $k_N = 0.95$; $k_p = 1.8$; $T_i = 0.75$ с; $k_k = 0.83$; $T_k = 0.27$ с

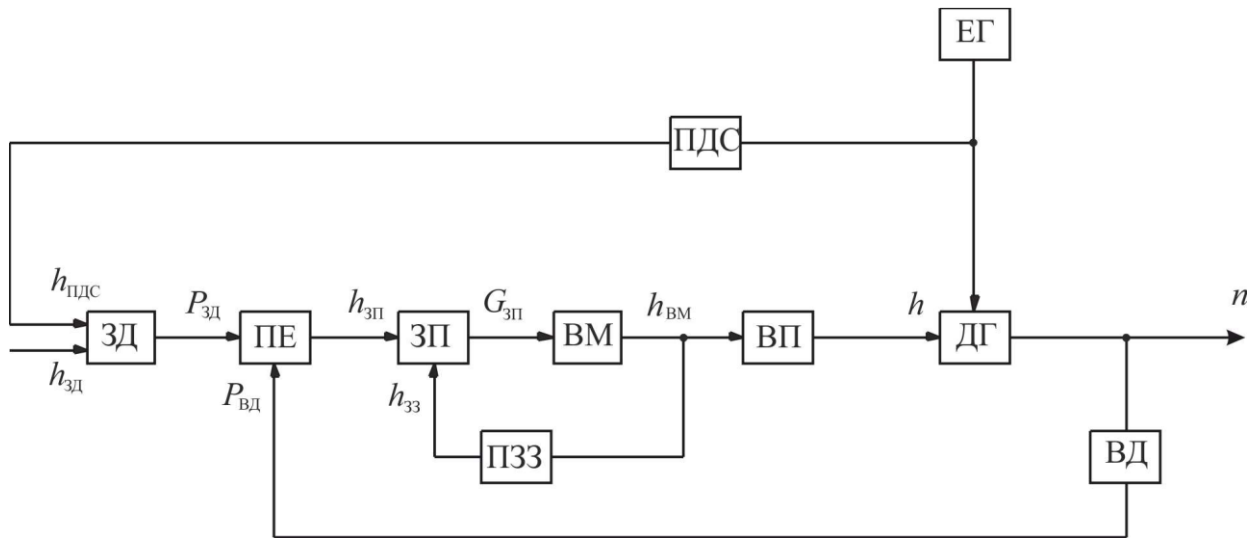


Рисунок 1 – Функціональна схема системи автоматичного регулювання частоти обертання валу дизельного двигуна з додатковим сигналом за навантаженням:
 ЗД – пристрій, що задає; ПЕ – порівнювальний елемент; ЗП – золотниковий підсилювач;
 ВМ – виконавчий механізм; ПЗЗ – пристрій зворотного зв'язку; ВП – важільна передача; ПДС – пристрій додаткового сигналу; ВД – відцентровий датчик;
 ДГ – дизель-генератор; ЕГ – електрогенератор

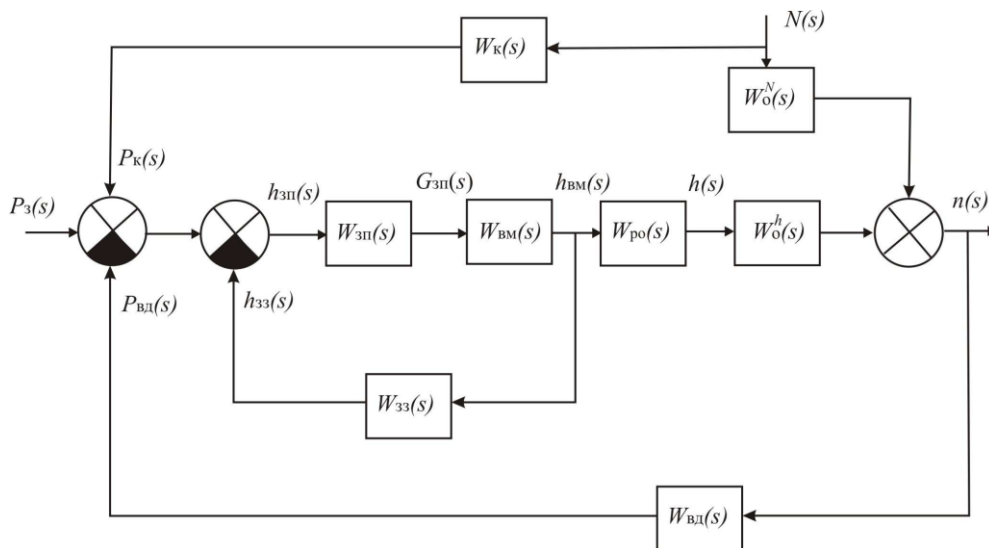


Рисунок 2 – Структурна схема системи автоматичного регулювання частоти обертання валу дизельного двигуна

Функціональну та структурну схеми САР частоти обертання дизель-генератора з додатковим сигналом за навантаженням показано на рис. 1-2.

Графік на рис. 3 демонструє перехідну характеристику традиційної (базової) САР дизельного двигуна при одиничному впливі на завдання. Цей перехідний процес використовується для порівняння динамічних властивостей системи та відображає налаштування ПІ-регулятора.

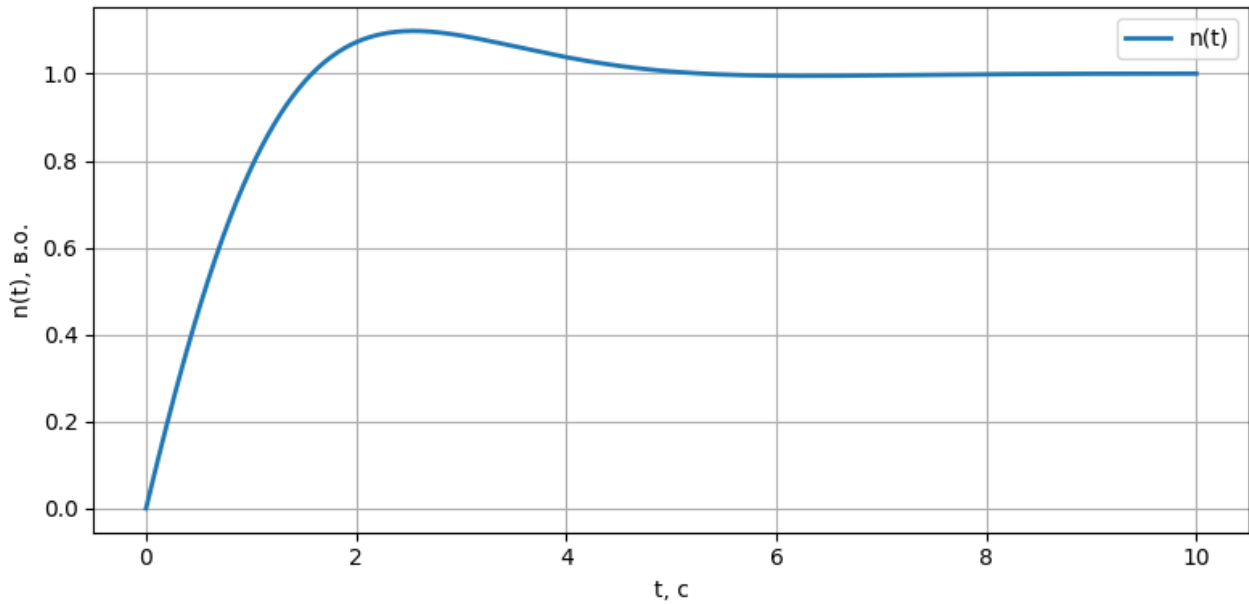


Рисунок 3 – Перехідна характеристика системи автоматичного регулювання обертання валу дизельного двигуна з ПІ-регулятором

На рис. 4 наведено перехідні процеси частоти обертання дизельного двигуна при дії ступінчастого збільшення навантаження, що реалізує збурювальний вплив на систему автоматичного регулювання. Порівнюються два варіанти: традиційна САР (тільки зворотний зв'язок за відхиленням) та комбінована САР із додатковим випереджальним сигналом від навантаження.

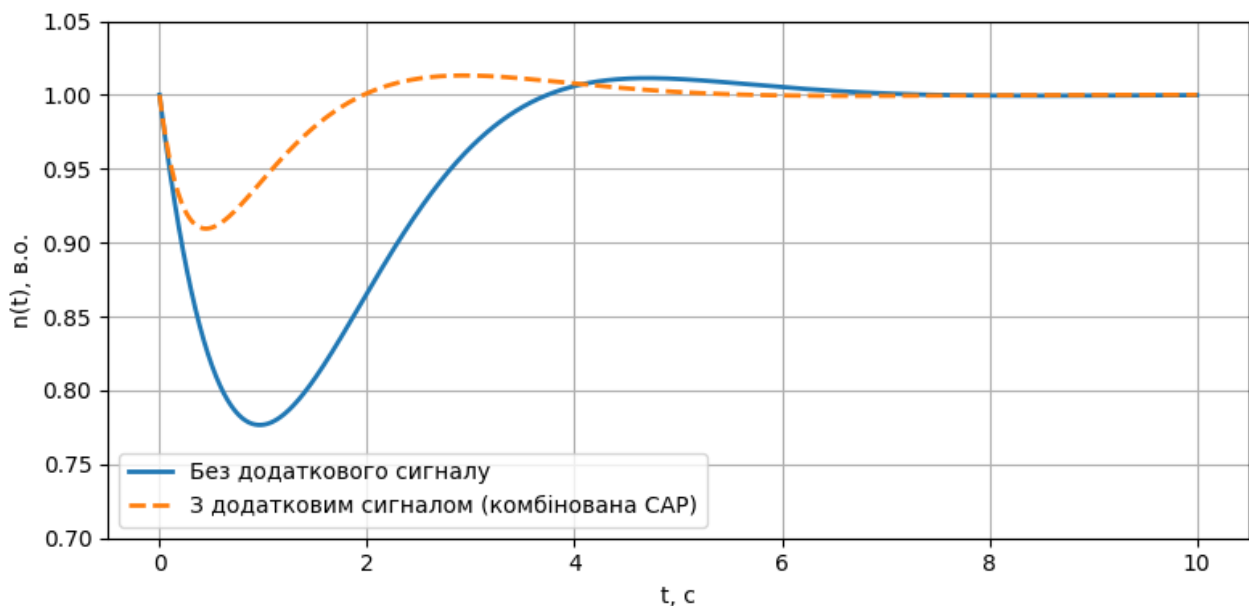


Рисунок 4 – Вплив ступінчастого навантаження на частоту обертання дизельного двигуна

У традиційній системі (суцільна лінія) після прикладання навантаження спостерігається значний динамічний провал частоти обертання до 15-18% від номінального рівня. Такий характер реакції зумовлений тим, що регулятор формує керувальну дію лише після появи відхилення частоти, що призводить до запізнення компенсації моменту навантаження. Подальший процес відновлення має коливальний характер, а усталення відбувається приблизно через 4-5 с, що свідчить про обмежену швидкодію та недостатнє придушення збурення.

Комбінована САР (пунктирна лінія), навпаки, демонструє значно кращу динаміку. Завдяки додатковому каналу, який подає пропорційний і згладжений сигнал навантаження у виконавчу частину регулятора, первинний провал частоти зменшується до $\approx 7-10\%$. Система швидше компенсує збурення, причому процес відновлення носить менш коливальний характер, а встановлення відбувається за 2-3 с. Частота обертання повертається до номінального значення зі зменшеною амплітудою відхилень і підвищеною стійкістю.

Таким чином, комбінована структура суттєво підвищує робастність та ефективність регулювання в умовах раптових змін навантаження, що є критичним для дизель-генераторних установок із високими вимогами до стабільності частоти.

Системи автоматичного регулювання частоти обертання дизельних двигунів мають важливе значення для забезпечення надійної роботи суднових силових установок і допоміжних механізмів. Умови експлуатації внутрішнього та морського флоту характеризуються швидкими і нерівномірними змінами навантаження, що виникають під час роботи насосних агрегатів, рульових машин, компресорів та інших суднових систем. Такі збурення без належного регулювання призводять до небажаних відхилень частоти, підвищення механічних навантажень на кривошипно-шатунний та газорозподільний механізми, а також погіршення загальної плавності роботи двигуна.

У цьому контексті порівняння традиційної та комбінованої структур регулювання дає змогу оцінити їх здатність забезпечувати стабільність частоти обертання в характерних для суднових силових установок перехідних режимах. Отримані результати моделювання показують, що комбінована САР підвищує ефективність компенсації навантажувальних збурень, зменшує динамічні впливи на механічні вузли та сприяє більш рівномірній і надійній роботі дизельних агрегатів у складі суднових допоміжних систем.

Висновок. У статті проаналізовано традиційну та комбіновану системи автоматичного регулювання (САР) частоти обертання дизельного двигуна на основі математичного та чисельно-імітаційного моделювання. Отримані перехідні характеристики дозволили оцінити вплив структурних рішень на показники якості регулювання. Для традиційної САР встановлено значний первинний провал частоти обертання при накиді навантаження (до 15-18 % від номіналу) та порівняно тривалий час встановлення (4-5 с). Це підтверджує обмежені можливості компенсування швидкоплинних збурень лише за зворотним зв'язком. Уведення додаткового випереджального сигналу у комбінованій САР забезпечило суттєве покращення динаміки: глибина провалу зменшилася до 7-10 %, а час відновлення – до 2-3 с. Частота обертання стабілізувалася швидше, а чутливість до навантажувальних збурень помітно знизилася. Отже, комбінована структура регулювання демонструє підвищену ефективність порівняно з традиційною САР і може бути рекомендована для застосування в дизель-генераторних установках із підвищеними вимогами до стабільності частоти обертання.

ЛІТЕРАТУРА

1. Ткачук Д. О., Панов С. Л., Гараженко М. І., Вільдяєва Л. М. Особливості прогнозування стану суднового обладнання в умовах транскеанських рейсів. *Водний транспорт*. 2018. С. 65-73. DOI: doi.org/10.33298/2226-8553/2018.1.27.11
2. Wharton A. J. Diesel Engines. 3rd ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1991. 144 p. DOI: https://doi.org/10.1016/C2009-0-24733-7
3. Bosch R. Diesel Engine Management: Systems and Components. Berlin: Springer Vieweg, 2014. 370 p.
4. Мельник О. В. Дослідження експлуатаційної надійності технічних засобів як фактор підвищення безпеки при проведенні суднових операцій. *Водний транспорт*. 2024. Вип. 1(39). С. 186-193. DOI: https://doi.org/10.33298/2226-8553.2024.1.39.19
5. Мельник О. В., Сорока В. В., Гаталяк М. Я. Методи зниження вмісту токсичних компонентів відпрацьованих газів суднових дизелів. *Водний транспорт*. 2020. Вип. 32. С. 64-75.
6. Мельник О. В., Тимошук О. М. Оптимізація заходів безпеки при бункеруванні суден. *Водний транспорт*. 2021. Вип. 2(33). С. 36-43. DOI: https://doi.org/10.33298/2226-8553/2021.2.33.04

7. Мельник О. В., Тимошук О. М. Інформаційно-логістичні системи в сучасних транспортних технологіях. *Інвестиції: практика та досвід*. 2015. Вип. 22. С. 79-83.
8. Будуров М. І. Оптимізація налаштування електронного регулятора частоти обертання суднового дизеля. *Двигуни внутрішнього згоряння*. 2025. № 1. С. 38-50.
9. Gorb S., Levinskyi O., Mykhalkiv V. Sensitivity optimisation of a main marine diesel engine electronic speed governor. *Scientific Horizons*. 2021. Vol. 24. No. 11. P. 9-19.
10. Gorb S., Popovskii A., Budurov M. Adjustment of speed governor for marine diesel generator engine. *International Journal of GEOMATE*. 2023. Vol. 25. No. 109. P. 125-132.
11. Вороненко С. В., Субботін О. В., Лебеденко Ю. О. Моделювання процесів у судновій комплексній електроенергетичній турбокомпресорній установці в перехідних режимах. *Прикладні питання математичного моделювання*. 2020. Т. 3. № 2(1). С. 116-145.
12. Аврунін О. Г., Владов С. І., Петченко М. В., Семенець В. В., Татарінов В. В., Тельнова Г. В., Філатов В. О., Шмельов Ю. М., Шушляпіна Н. О. Інтелектуальні системи автоматизації. Монографія. Кременчук: НОВАБУК. 2021. 322 с.
13. Mancini G., Paviotti M., Ponti F. Dynamic feedforward control of a diesel engine based on optimal transient compensation maps. *Energies*. 2014. Vol. 7. P. 5400-5427.
14. Huang M. Research on H₂ speed governor for diesel engine of marine power station. *Journal of Marine Science and Application*. 2007. Vol. 6. P. 51-57.
15. Weigang P., Changliang X., Yufei W. Design of diesel engine adaptive active disturbance rejection controller. *The Open Automation and Control Systems Journal*. 2015. Vol. 7. P. 1429-1437.
16. Xia M., Zhang H., Li Y. Research on feedforward–feedback speed control of turbocharged diesel engine. *Proceedings of International Conference on Control of Turbocharged Diesel Engines*. 2016. P. 1-6.
17. Кириченко О. С. Підвищення енергоефективності роботи електронасосних агрегатів. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. 2013. Т. 51. № 1024. С. 28-35.
18. Машін В. М., Цацко В. І. Елементи суднової автоматики. Навчальний посібник. Одеса: ОНМУ, 2023. 250 с. DOI: <https://doi.org/10.47049/ONMU-2023-NP12>
19. Кириченко О. С., Білюк І. С., Шарейко Д. Ю., Фоменко А. М., Гаврилов С. О., Бугрім Л. П. Чисельне тривимірне моделювання термоелектричного охолоджувача вимірювального електроустаткування автоматичних систем. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2018. Т. 29 (68). Ч. 1. № 6. С. 58-63.
20. Isermann R. *Engine Modeling and Control: Modeling and Electronic Management of Internal Combustion Engines*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2014. 637 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-642-39934-3>.
21. Левченко О.В., Маранов О.В. Поточний стан дослідження питання прогнозування маневреності суден та їхньої гідродинаміки в обмежених водах // *Водний транспорт: Збірник наукових праць*. – 2025. – Вип. 1(42). – С. 55-60. doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.08.
22. Сагін С.В., Бондар С.А., Столярик Т.О. Оцінка безвідмовності суднових дизелів за технічним станом моторного мастила циркуляційних систем мащення // *Водний транспорт*. – 2023. – № 1(37). – С. 59-70. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.1.37.06.
23. Melnyk O., Bulgakov M., Fomin O., Onyshchenko S., Onishchenko O., Pulyaev I. Sustainable development of renewable energy in shipping: Technological and environmental prospects // *Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport*. – 2025. – № 127. – P. 165–188. <https://doi.org/10.20858/sjsutst.2025.127.10>.

REFERENCES

1. Tkachuk D. O., Panov S. L., Harazhenko M. I., Vildiaieva L. M. Osoblyvosti prohnozuvannia stanu sudnovoho obladnannia v umovakh transokeanskykh reisiv. *Vodnyi transport*. 2018. S. 65-73. DOI: doi.org/10.33298/2226-8553/2018.1.27.11
2. Wharton A. J. *Diesel Engines*. 3rd ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1991. 144 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/C2009-0-24733-7>
3. Bosch R. *Diesel Engine Management: Systems and Components*. Berlin: Springer Vieweg, 2014. 370 p.
4. Melnyk O. V. Doslidzhennia ekspluatatsiinoi nadiinosti tekhnichnykh zasobiv yak faktor pidvyshchennia bezpeky pry provedenni sudnovykh operatsii. *Vodnyi transport*. 2024. Vyp. 1(39). S. 186-193. DOI: <https://doi.org/10.33298/2226-8553.2024.1.39.19>
5. Melnyk O. V., Soroka V. V., Hataliak M. Ya. Metody znyzhennia vmistu toksychnykh komponentiv vidpratsovanykh haziv sudnovykh dyzeliv. *Vodnyi transport*. 2020. Vyp. 32. S. 64-75.

6. Melnyk O. V., Tymoshchuk O. M. Optymizatsiia zakhodiv bezpeky pry bunkeruvanni suden. *Vodnyi transport*. 2021. Vyp. 2(33). S. 36-43. DOI: <https://doi.org/10.33298/2226-8553/2021.2.33.04>
7. Melnyk O. V., Tymoshchuk O. M. Informatsiino-lohistychni systemy v suchasnykh transportnykh tekhnolohiiakh. *Investytsii: praktyka ta dosvid*. 2015. Vyp. 22. S. 79-83.
8. Budurov M. I. Optymizatsiia nalashtuvannia elektronnoho rehuliatora chastoty obertannia sudnovoho dyzelia. *Dvyhuny vnutrishnoho zghoriannia*. 2025. № 1. S. 38-50.
9. Gorb S., Levynskyi O., Mykhalkiv V. Sensitivity optimisation of a main marine diesel engine electronic speed governor. *Scientific Horizons*. 2021. Vol. 24. No. 11. P. 9-19.
10. Gorb S., Popovskii A., Budurov M. Adjustment of speed governor for marine diesel generator engine. *International Journal of GEOMATE*. 2023. Vol. 25. No. 109. P. 125-132.
11. Voronenko S. V., Subbotin O. V., Lebedenko Yu. O. Modeliuvannia protsesiv u sudnovii kompleksnii elektroenerhetychnii turbokompresornii ustanovtsi v perekhidnykh rezhymakh. *Prykladni pytannia matematychnoho modeliuvannia*. 2020. T. 3. № 2(1). S. 116-145.
12. Avrunin O. H., Vladov S. I., Petchenko M. V., Semenets V. V., Tatarinov V. V., Telnova H. V., Filatov V. O., Shmelov Yu. M., Shushliapina N. O. *Intelektualni systemy avtomatyzatsii*. Monohrafiia. Kremenchuk: NOVABUK. 2021. 322 s.
13. Mancini G., Paviotti M., Ponti F. Dynamic feedforward control of a diesel engine based on optimal transient compensation maps. *Energies*. 2014. Vol. 7. P. 5400-5427.
14. Huang M. Research on H₂ speed governor for diesel engine of marine power station. *Journal of Marine Science and Application*. 2007. Vol. 6. P. 51-57.
15. Weigang P., Changliang X., Yufei W. Design of diesel engine adaptive active disturbance rejection controller. *The Open Automation and Control Systems Journal*. 2015. Vol. 7. P. 1429-1437.
16. Xia M., Zhang H., Li Y. Research on feedforward–feedback speed control of turbocharged diesel engine. *Proceedings of International Conference on Control of Turbocharged Diesel Engines*. 2016. P. 1-6.
17. Kyrychenko O. S. Pidvyshchennia enerhoefektyvnosti roboty elektronasosnykh ahrehativ. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI»*. 2013. T. 51. № 1024. S. 28-35.
18. Mashin V. M., Tsatsko V. I. *Elementy sudnovoi avtomatyky*. Navchalnyi posibnyk. Odesa: ONMU, 2023. 250 s. DOI: <https://doi.org/10.47049/ONMU-2023-NP12>
19. Кириченко О. С., Білюк І. С., Шарейко Д. Ю., Фоменко А. М., Гаврилов С. О., Бугрім Л. П. Чисельне тривимірне моделювання термоелектричного охолоджувача вимірювального електроустаткування автоматичних систем. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2018. Т. 29 (68). Ч. 1. № 6. С. 58-63.
20. Isermann R. *Engine Modeling and Control: Modeling and Electronic Management of Internal Combustion Engines*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2014. 637 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-642-39934-3>.
21. Levchenko O.V., Maranov O.V. The current state of research on predicting the manoeuvrability of ships and their hydrodynamics in confined waters // *Water transport*. – 2025. – № 1(42). – P. 55–60. doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.08.
22. Sagin S.V., Bondar S.A., Stoliaryk T.O. Assessment of the reliability of marine diesel engines according to the technical condition of engine oil of circulating lubrication systems // *Water transport*. – 2023. – Vol. 1(37). – P. 59-70. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.1.37.06.
23. Melnyk O., Bulgakov M., Fomin O., Onyshchenko S., Onishchenko O., Pulyaev I. Sustainable development of renewable energy in shipping: Technological and environmental prospects // *Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport*. – 2025. – № 127. – P. 165–188. <https://doi.org/10.20858/sjsutst.2025.127.10>.

S.L. Panov, O.V. Liashko, V.A. Stepukh, O.V. Pastukh

ANALYSIS OF THE DYNAMICS OF A COMBINED AUTOMATIC SPEED CONTROL SYSTEM FOR A DIESEL ENGINE

The article considers the relevant task of ensuring a stable rotational speed of a diesel engine shaft under sharp changes in mechanical load, which are characteristic of ship power plants. The dynamic interaction of the load with the engine leads to short-term deviations of the rotational speed, which negatively affects the stability of the power unit, the uniformity of fuel supply, and the mechanical loading of the valvetrain components and the crank-and-connecting-rod mechanism. Traditional automatic speed control systems based

on feedback have limited capability for quickly compensating such disturbances, which results in a significant speed drop and a delay in restoring the steady-state mode.

To improve dynamic stability, a combined control system is considered, in which a feedforward signal that accounts for the nature of the applied load is added to the main control loop. Based on the operator description of the system elements, a mathematical model was constructed and numerical-simulation modelling of the engine response to the load change was performed. Analysis of the obtained transient processes made it possible to evaluate the key dynamic indicators: the depth of speed drop, the response speed, the stability, and the system's ability to damp mechanical disturbances.

Comparison of the traditional and combined control structures showed that the use of an additional feedforward signal makes it possible to reduce the speed deviation almost by half and to shorten the recovery time to the steady-state mode. The obtained results confirm the effectiveness of combined control for increasing the reliability and mechanical stability of diesel engines in transient operating conditions, which is important for ship power systems.

Keywords: *automatic control system; diesel engine; rotational speed; combined control system; dynamic characteristics; speed drop; numerical-simulation modelling.*

Стаття прийнята 25.10.2025