

10.31653/smf50.2025.116-130

Сагін С.В., Заблоцький Ю.В., Поповський А.Ю., Сагін А.С.

Національний університет «Одеська морська академія»

**АДАПТАЦІЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ
ЧАСТОТИ ОБЕРТАННЯ СУДНОВИХ ДИЗЕЛІВ ПІД ЧАС ЇХ
ПЕРЕВЕДЕННЯ НА ПАЛИВО З НИЗЬКИМ ВМІСТОМ СІРКИ**

Постановка проблеми в загальному вигляді. Під час експлуатації дизелів морських суден забезпечується розв'язання завдань не лише підтримання їх ефективності та технічного стану, але також з виконання міжнародних та національних вимог з попередження забруднення довкілля [1-3]. Однією зі шкідливих речовин, що є складовою робочого циклу суднових дизелів та без якої неможливо його існування, є випускні гази [4-6]. Негативне дія випускних газів полягає у присутності в їх об'єму токсичних компонентів, концентрація деяких з них (насамперед оксидів азоту NO_x) регламентується вимогами Додатку VI МАРПОЛ. Обмеження з боку МАРПОЛ також розповсюджуються на емісію ще одного токсичного компоненту – оксидів сірки SO_x , при чому рівень цих викидів регламентується вмістом сірки у паливі [7-9].

З 01.01.2020 р. відповідно до Додату VI МАРПОЛ вміст сірки в паливі не повинен перевищувати 0,1 % за умови експлуатації судна в зонах спеціального екологічного контролю (Sulphur Emission Control Areas – SECAs) та не більше 0,5 % під час експлуатації судна поза районами SECAs. Спеціальні зони SECAs визначаються Міжнародною морською організацією (International Maritime Organization – ІМО). Для країн Європи до них належать акваторії Північного, Балтійського та Середземного морів, а також введені з травня 2025 року акваторії Норвезького моря та Північної Атлантики [10-12]. Експлуатація суднових дизелів з використанням палива, вміст сірки в якому перевищує 0,5 % дозволена виключно в разі, коли їх випускні гази додатково очищуються в спеціальних системах, найбільш розповсюдженими з яких є скрубери- SO_x [13-15].

Додатково діє стандарт ISO 8217, який регламентує фізико-хімічні властивості суднового палива, включаючи в'язкість, густину, вміст води та зольність, стабільність і сумісність [16-18]. Ці характеристики визначають якість згоряння, надійність паливної апаратури та загальний ресурс суднових енергетичних установок.

Запровадження таких норм суттєво підвищує екологічну безпеку судноплавства, проте водночас створює певні технічні виклики. У першу чергу це пов'язано зі зміною динамічних характеристик процесу згоряння в судових двигунах під час їх переведення на паливо з низьким вмістом сірки [19-21]. В цих випадках змінюється повнота та рівномірність згоряння, що відображається на стабільності робочих параметрів – насамперед динамічних навантажень і миттєвої зміні частоти обертів двигуна. Ці фактори безпосередньо впливають на надійність роботи судової енергетичної установки – пропульсивної або електроенергетичної [22-24].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Зниження вмісту сірки в судовому паливі чинить комплексний вплив на процес згоряння у двигунах внутрішнього згоряння. Традиційно сірка виконувала не лише роль забруднювача, але й певною мірою впливала на фізико-хімічні властивості палива, включаючи змащувальну здатність і стабільність [25, 26]. У разі зменшення її вмісту у паливі змінюються такі параметри, як в'язкість, температура займання та швидкість поширення фронту полум'я [27, 28]. Одночасно з цим підвищується вміст в паливі інших складових – вуглецю та водню, що призводить до збільшення теплотворної здатності палива та у подальшому у збільшення теплової енергії що утворюється під час згоряння палива, перетворюється на кінетичну енергію газів, створює тиск на поршень, забезпечує його поступальний рух та обертальний рух колінчатого валу [29, 30]. Основні експлуатаційні характеристики судових палив з різним вмістом сірки наведено у таблиці 1.

Таблиця 1. Експлуатаційні характеристики судових моторних палив

Характеристика	RME380	DMA20	DMA10	DMA10LS
Густина при 20°C, кг/м ³	892	842	822	818
В'язкість при 40°C, мм ² /с	358,3	19,6	9,8	9,6
Вміст, %				
вуглецю	83,27	84,3	84,4	84,6
водню	10,45	11,7	11,8	11,8
кисню	1,75	1,4	1,32	1,23
сірки	0,5	0,1	0,06	0,02
вологі	2,93	2	1,92	1,85
азоту	1,1	0,5	0,5	0,5
Нижча теплотворна здатність, кДж/кг	40897,3	42865,7	43045,6	43137,5

З теоретичної точки зору процес згоряння у дизельному двигуні складається з кількох фаз: затримки займання, швидкого тепловиділення, контрольованого горіння та догоряння. Кожна з цих фаз є чутливою до складу палива. Використання низькосірчистого палива може збільшувати період затримки займання, що призводить до нерівномірного утворення паливоповітряної суміші. Унаслідок цього змінюється характер тепловиділення: частина енергії вивільняється різкіше, викликаючи підвищені коливання тиску в циліндрі й, як наслідок, зростання механічних і теплових навантажень [31, 32].

Ці зміни відображаються на динамічних характеристиках двигуна [33, 34]. Коливання тиску й температури призводять до нестабільності обертів, а система автоматичного регулювання змушена частіше втручатися у робочий процес. У сучасних суднових двигунах застосовується система автоматичного регулятора, завдання якої — підтримувати сталі оберти при зміні навантаження. Проте за умов нерівномірного згоряння зростає кількість коригувальних впливів, що підвищує зношування елементів паливної апаратури та збільшує ймовірність перевантаження системи управління. Регулювання цих змін вимагає додаткового переналаштування регулятора частоти обертання дизеля з урахуванням зміни збурюючої дії, якою у цьому випадку є вміст сірки в паливі та його теплотворна здатність [35, 36].

Таким чином, зниження вмісту сірки та зміна складу палива призводять не лише до екологічних переваг, але й до появи нових експлуатаційних ризиків. Дизель працює в більш напруженому динамічному режимі, з постійними змінами у перебігу робочого процесу. Це вимагає врахування цих факторів під час регулювання частоти обертання дизеля та врахування її миттєвого збільшення у разі введення дизеля на використання палива з низьким вмістом сірки.

Зміни у вимогах міжнародних стандартів, перш за все Додатку VI МАРПОЛ 73/78 та ISO 8217, безпосередньо впливають на експлуатацію суднових енергетичних установок. Перехід на палива з низьким вмістом сірки та використання модифікованих сортів палива підвищує екологічну безпеку судноплавства, проте водночас зумовлює необхідність враховувати нові динамічні характеристики процесу згоряння [37, 38].

Нестійкість займання, зростання коливань тиску й температури в циліндрі, а також збільшення навантаження на системи регулювання створюють додаткові експлуатаційні ризики. За таких умов надійність і ефективність роботи суднового двигуна значною мірою зале-

жать від того, наскільки грамотно організовані регулювання робочого процесу та технічне обслуговування.

Для мінімізації негативних наслідків потрібен комплексний підхід, що включає:

- адаптацію систем автоматичного регулювання обертів і навантаження до особливостей палива з низьким вмістом сірки;
- використання сучасних систем моніторингу якості палива та робочих параметрів дизеля;
- коригування режимів згоряння шляхом оптимізації подачі палива та організації процесу сумішоутворення [39-41].

Отже, урахування впливу вмісту сірки та складу палива на процес згоряння слід розглядати як один із ключових факторів в разі оцінці надійності суднових двигунів. Лише системний аналіз цих параметрів дозволяє забезпечити як відповідність міжнародним екологічним вимогам, також й стабільну, безпечну та економічну експлуатацію суднової енергетичної установки.

Постановка завдання. Завданням дослідження було вивчення зміни динамічних навантажень, що виникають під час переведення суднового дизеля на паливо з низьким вмістом сірки та адаптація систем автоматичного регулювання частоти обертання дизеля до цих умов.

Виклад основного матеріалу дослідження. Дослідження полягали у моделюванні перехідних процесів системи автоматичного регулювання частоти обертання колінчатого валу дизеля в разі зміни збурюючої дії, що пов'язана зі збільшенням теплотворної здатності палива та, відповідно, збільшенням миттєвих навантажень на поршневу групу дизеля в разі його переведення на використання палива з низьким вмістом сірки.

Як об'єкт регулювання приймався судновий дизель з частотою обертання 720 об/хв. Як регулятор розглядався електронний регулятор швидкісного режиму дизеля, що забезпечує пропорційно-інтегральний процес регулювання.

Процеси зміни регульованого параметру з часом для двигуна згідно з принципом Д'Аламбера можуть бути промодельовані як розв'язок звичайного (та у першому наближенні майже лінійного) диференційного рівняння:

$$T_o \frac{d\varphi}{dt} + \varphi = k_o [\mu - f(t)]; \quad (1)$$

де T_O – часу розгону дизеля, як об'єкту регулювання частоти обертання, с;

k_O – коефіцієнту підсилення дизеля, як об'єкту регулювання частоти обертання, с;

φ – відносна зміна частоти обертання дизеля;

μ – відносна регулююча дія, пов'язана зі зміною циклової подачі палива;

$f(t)$ – відносна збурююча дія, пов'язана за зміною частоти навантаження на дизель;

t – час, с.

Значення характеристик об'єкту регулювання (часу розгону T_O та коефіцієнту підсилення k_O) обиралися згідно експериментальним спостереженням. Відносна збурююча дія $f(t)$ моделювалось східчато-подібною функцією із можливістю варіювання величина ступінчастого навантаження та тривалості часу зростання (яке для всіх випадків приймалось 0,1 с).

Пропорційно-інтегральний (астатичний) регулятор, що розглядався як складова системи автоматичного регулювання частоти обертання, передбачав можливість роздільного варіювання параметрів налаштування. За такі параметри приймалися коефіцієнт підсилення k_p (що визначався у відносних одиницях) та час інтегрування T_i (що вимірювалось у секундах).

Зміна з часом вихідного сигналу регулятора – відносного значення регулюючої дії, а також відносного значення регульованої величини визначалося як розв'язок диференціального рівняння:

$$\frac{d\mu}{dt} = - \left[\frac{1}{T_i} \varphi(t) + k_p \frac{d\varphi}{dt} \right] \quad (2)$$

із врахуванням при його інтегруванні ненульових початкових умов:

$$\begin{cases} \varphi(0) = v, \\ v(0) = 1/k_O, \end{cases} \quad (3)$$

де v – значення сигналу завдання (уставки регулятора)ю

Рівняння (2) розв'язувалася чисельно у середовищі комп'ютерної математики Matlab / Simulink з вибором методу чисельного інтегрування у вигляді алгоритму Рунге-Кутта із адаптованим кроком розбиття інтервалу моделювання (але з умовою того, щоб максимальне значення кроку розбиття не перевищувало 0,01 с для забезпечення

гладкості відтворюємої функції). Врахування ненульових початкових умов забезпечувалося використанням спеціальних блоків з пакету Simulink Extras [42, 43].

Схема візуального моделювання представлена на рис. 1.

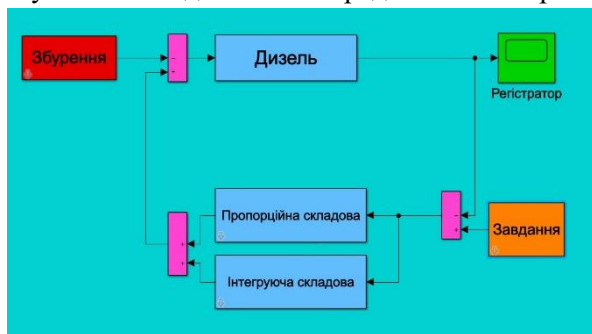


Рис. 1. Візуалізація моделі системи автоматичного регулювання частоти обертання колінчатого валу дизеля

На рис. 1 позначені наступні елементи системи автоматичного регулювання:

- збурення – джерело збурюючої дії $f(t)$, яка змінюється за східчато-подібним законом з тривалістю фронту наростання – 0,1 с і можливістю завдання вихідного рівню;
- дизель – об’єкт регулювання, вихідний сигнал якого (відносне значення швидкості обертання) є $\varphi(t)$;
- пропорційна складова та інтегруюча складова – паралельно з’єднані та підключені у від’ємний зворотний зв’язок ділянки астатичного ізодромного регулятора з можливістю роздільного варіювання налаштувальних параметрів (коефіцієнту підсилення за пропорційною складовою k_p та часу інтегрування T_i);
- завдання – блок, який забезпечує значення відносної швидкості обертання двигуна (у відносних одиницях) з можливістю зміни режиму; значення уставки $v=1$ відповідає номінальному режиму роботи двигуна;
- регістратор – блок, який виконує фіксацію регульованої величини та візуалізацію її значень.

Моделювання виконувалося для трьох різних відносних навантажень – $f_0=0,4$; $f_0=0,3$; $f_0=0,2$, що відповідало переведенню дизеля з палива RME380 (зі вмістом сірки 0,5 %) на паливо DMA20 (зі вмістом сірки 0,1 %), на паливо DMA10 (зі вмістом сірки 0,06 %) та на паливо DMA10LS (зі вмістом сірки 0,02 %) відповідно.

Зміна параметрів налаштування регулятора обирались в діапазоні:

- коефіцієнт підсилення за пропорційною складовою $k_p=[0,8\dots2,4]$ з кроком зміни $\Delta k_p=0,8$;
- час інтегрування $T_i=[0,1\dots0,4]$ с з кроком зміни $\Delta T_i=0,15$ с.

Налаштування режиму роботи системи автоматичного регулювання виконувалось шляхом покоординатної оптимізації, де як критерії оптимізації приймалися тривалість перехідного процесу t_p , с, та динамічне закидання σ , %. Варійованими параметрами були параметри налаштування регулятора – коефіцієнт підсилення за пропорційною складовою k_p та час інтегрування T_i .

Зміни у характеру перебігу перехідного процесу для різних параметрів навантаження та зовнішнього збурення проілюстровані на рис. 2-4.

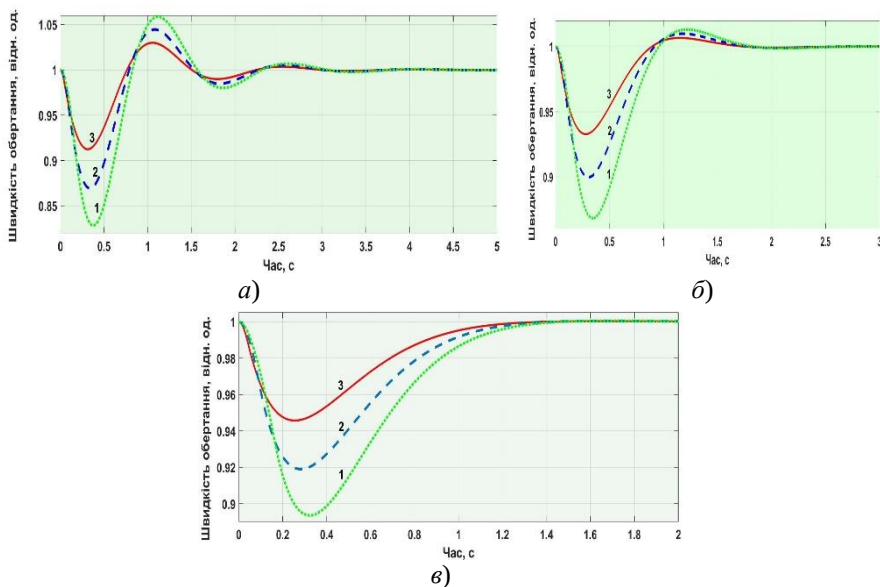


Рис. 2. Перехідні процеси в системі автоматичного регулювання частоти обертання валу дизеля за умовою: 1 – $f_0=0,4$; 2 – $f_0=0,3$; 3 – $f_0=0,1$;
а – $T_i=0,1$ с, $k_p=0,8$; б – $T_i=0,1$ с, $k_p=1,6$; в – $T_i=0,1$ с, $k_p=2,4$

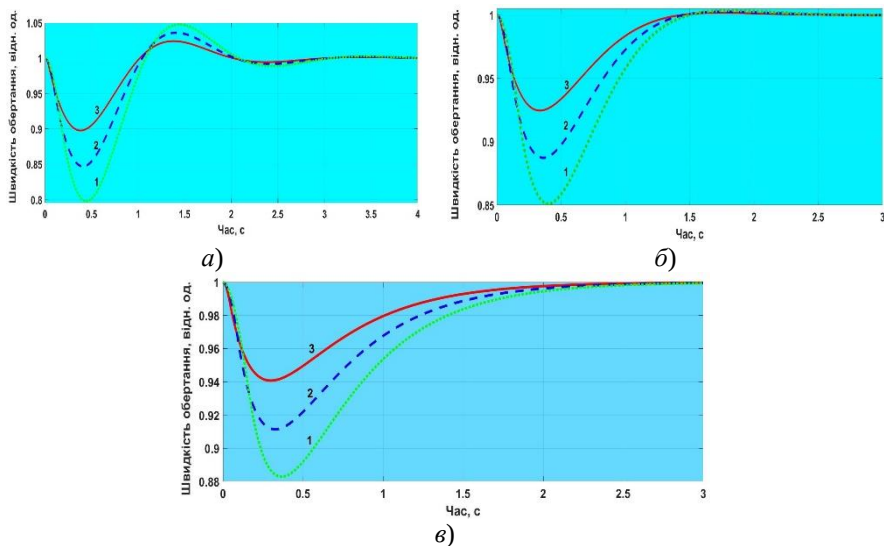


Рис. 3. Перехідні процеси в системі автоматичного регулювання частоти обертання валу дизеля за умовою: 1 – $f_0=0,4$; 2 – $f_0=0,3$; 3 – $f_0=0,1$;
 а – $T_i=0,25$ с, $k_p=0,8$; б – $T_i=0,25$ с, $k_p=1,6$; в – $T_i=0,25$ с, $k_p=2,4$

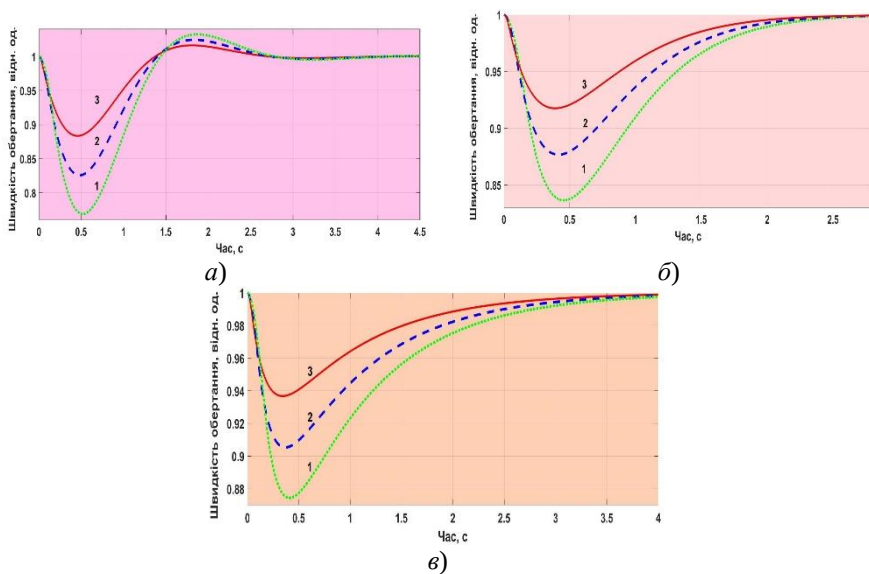


Рис. 4. Перехідні процеси в системі автоматичного регулювання частоти обертання валу дизеля за умовою: 1 – $f_0=0,4$; 2 – $f_0=0,3$; 3 – $f_0=0,1$;
 а – $T_i=0,4$ с, $k_p=0,8$; б – $T_i=0,4$ с, $k_p=1,6$; в – $T_i=0,4$ с, $k_p=2,4$

Результати визначення з графіків значень типових параметрів якості перехідних процесів, які водночас є критеріями оптимізації – часу регулювання та відносного динамічного закиду зведені у таблицю 2.

Таблиця 2. Критерії оптимізації системи автоматичного регулювання для різних значень параметрів налаштувань регулятора

Відносне навантаження f_0	Параметри налаштування		Критерії оптимізації	
	k_p , відн. од.	T_i , с	σ , %	t_p , с
0,4	0,8	0,10	17	2,0
		0,25	20	1,9
		0,40	23	2,3
	1,6	0,10	14	1,2
		0,25	15	1,3
		0,40	16	1,9
	2,4	0,10	11	1,1
		0,25	12	1,8
		0,40	13	2,4
0,3	0,8	0,10	13	1,7
		0,25	15	1,6
		0,40	17	2,1
	1,6	0,10	10	0,8
		0,25	11	1,2
		0,40	12	1,8
	2,4	0,10	8	1,0
		0,25	9	1,6
		0,40	9	2,1
0,2	0,8	0,10	8	1,4
		0,25	10	1,6
		0,40	11	1,9
	1,6	0,10	7	0,7
		0,25	7	1,1
		0,40	8	1,7
	2,4	0,10	5	0,9
		0,25	6	1,4
		0,40	6	1,9

Результати, що наведені в таблиці 2, свідчать, що для покращення якості перехідних процесів в САР в цілому (з деякими незначними відхиленнями внаслідок коливального характеру перехідних про-

цесів) слід зупинитися на значеннях $k_p=2,4$ та $T_i=0,1$ с. Для цих значень час регулювання (в залежності від рівня навантаження) знаходиться у межах – $t_p=(0,9 \dots 1,1)$ с, а відносне динамічне закидання – у межах $\sigma=(5 \dots 11)$ %.

Висновки і перспективи подальших досліджень. Наведені результати досліджень дозволяють зробити наступні висновки.

1. Переведення судових дизелів з паливо зі вмістом сірки 0,5 % на палива, вміст сірки в якому не перевищує 0,1 %, призводить до необхідності адаптації їх систем автоматичного регулювання частоти обертання валу. Ці питання стають актуальними під час знаходження суден морського транспорту в спеціальних екологічних районах контролю викидів оксидів сірки.

2. Завдання забезпечення якості стабілізації частоти обертів роботи дизеля в таких випадках розв'язується класичним шляхом варіювання налаштувальних параметрів аналогового лінійного регулятора, алгоритм роботи якого відповідав пропорційно-інтегруючому закону. Обидва з варіюваних параметрів – коефіцієнти підсилення за пропорційною та інтегруючою складовою (час інтегрування) мали можливість незалежної зміни, що зводило задачу мінімізації критерію оптимальності до класичної двопараметричної задачі. Як критерії оптимізації процесу регулювання використовувалися найважливіші прямі показники перехідних процесів – відносна величина динамічного закиду регульованої характеристики (частоти обертання) та тривалість процесу регулювання.

3. Шляхом імітаційного комп'ютерного моделювання (у програмному середовищі Matlab / Simulink) були визначені оптимальні параметри налаштування регулятора, які близькі до оптимальних значень: коефіцієнт підсилення за пропорційною компонентою – 2,4 та обернений коефіцієнт пропорційності (час інтегрування) за інтегруючою складовою – 0,1 с. При цьому забезпечуються найменші значення критеріїв оптимальності. В залежності від рівня зовнішнього навантаження вони знаходилися у наступних діапазонах час регулювання – $t_p=(0,9 \dots 1,1)$ с та величина відносного перерегулювання – $\sigma=(5 \dots 11)$ %. Це, у свою чергу, забезпечує оптимальний процес виходу швидкісного режиму головного двигуна на новий сталий режим під час його переведення на використання палива вміст сірки в якому не перевищує 0,1 %.

Перелік використаних джерел

1. Melnyk O., Onyshchenko S., Onishchenko O. Development measures to enhance the ecological safety of ships and reduce operational pollution to the environment // *Sci. J. Silesian Univ. Technol. Series Transp.* 2023. Vol. 118. P. 195–206. <https://doi.org/10.20858/sjsutst.2023.118.13>.
2. Petrychenko O., Levinskyi M. Trends and preconditions for widespread adoption of liquefied natural gas in maritime transport // *Transport Systems and Technologies.* 2024. Vol. 43. P. 21–36. DOI:10.32703/2617-9059-2024-43-2.
3. Левченко О.В., Маранов О.В. Інтеграція комбінованих систем підтримки ухвалення рішень для забезпечення навігаційної безпеки та оптимізації руху суден у портових акваторіях // *Водний транспорт: Збірник наукових праць.* 2025. Вип. 1(42). С. 99–108. doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.14.
4. Sagin S.V., Sagin S.S., Madey V. Analysis of methods of managing the environmental safety of the navigation passage of ships of maritime transport // *Technology Audit and Production Reserves.* 2023. № 4 (3(72)). P. 33–42. doi: <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2023.286039>.
5. Сагін С.В., Куропятник О.А. Визначення оптимальних режимів процесів управління випускними газами судових дизелів // *Водний транспорт: Збірник наукових праць.* 2024. Вип. 2(40). С. 173–185. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.2.40.16.
6. Сагин С.В., Куропятник А.А. Оптимизация режимов работы системы перепуска выпускных газов судовых среднеоборотных дизелей // *Автоматизация судовых технических средств: науч. -техн. сб.* 2019. Вып. 25. С. 79–89.
7. Madey V. Assessment of the efficiency of biofuel use in the operation of marine diesel engines // *Technology Audit and Production Reserves.* 2022. Vol. 2(1(64)). P. 34–41. doi: <http://doi.org/10.15587/2706-5448.2022.255959>.
8. Sagin S., Sagin A. Development of method for managing risk factors for emergency situations when using low-sulfur content fuel in marine diesel engines // *Technology Audit and Production Reserves.* 2023. № 5 (1(73)). P. 37–43. doi: <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2023.290198>.
9. Stoliaryk T. Analysis of the operation of marine diesel engines when using engine oils with different structural characteristics // *Technol-*

ogy Audit and Production Reserves. 2022. Vol. 5(1(67)). P. 22–32. doi: <http://doi.org/10.15587/2706-5448.2022.265868>.

10. Budashko V., Shevchenko V. Solving a task of coordinated control over a ship automated electric power system under a changing load // East.-Eur. J. Enterp. Technol. 2021. Vol. 2(110). P. 54-70. doi: 10.15587/1729-4061.2021.229033.

11. Мадей В.В., Сагін С.В., Волков О.М. Управління процесом впорскування під час використання в суднових дизелях паливних сумішей до складу яких входить паливо біологічного походження // Водний транспорт. Збірник наукових праць. 2024. Вип. 1(39). С. 193-205. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.38.21.

12. Sagin S., Kuropyatnyk O., Tkachenko I. Ensuring the environmental friendliness of marine diesel engines of specialized ships // Суднові енергетичні установки : наук.-техн. зб. 2022. Вип. 45. С. 5-16. doi: 10.31653/smf45.2022.5-16.

13. Левченко О.В., Ганношина І.М., Остапчук Т.В. Система інформаційного забезпечення процесів прийняття рішень на мостіку судна // Водний транспорт: Збірник наукових праць. 2025. Вип. 1(42). С. 24-27. doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.04.

14. Melnyk O., Onyshchenko S., Onishchenko O., Koskina Y., Lohinov O., Veretennik O., Stukalenko O. Fundamental Concepts of Deck Cargo Handling and Transportation Safety // Eur. Transp. 2024. Vol. 98. P. 1. <https://doi.org/10.48295/ET.2024.98.1>.

15. Budashko V., Obniavko T., Onishchenko O., Dovidenko Y., Ungarov D. Main Problems of Creating Energy-efficient Positioning Systems for Multipurpose Sea Vessels // 2020 IEEE 6th International Conference on Methods and Systems of Navigation and Motion Control. 2020. P. 106–109, doi: 10.1109/MSNMC50359.2020.9255514.

16. Мадей В.В., Волков О.М. Оптимізація процесу паливоподачі дизелів суден морського транспорту під час використання паливних сумішей до складу яких входить біодизельне паливо // Суднові енергетичні установки: наук.-техн. зб. 2022. Вип. 45. С. 43-56. doi: 10.31653/smf45.2022.43-56.

17. Sagin S., Sagin A., Zablotskyi Y., Fomin O., Pišt'ek V., Kučera P. Method for Maintaining Technical Condition of Marine Diesel Engine Bearings // Lubricants. 2025. Vol. 13(4). P. 146. <https://doi.org/10.3390/lubricants13040146>.

18. Petrychenko O., Levinskyi M., Goolak S., Lukoševičius V. Prospects of Solar Energy in the Context of Greening Maritime Transport //

Sustainability. 2025. Vol. 17. P. 2141.
<https://doi.org/10.3390/su17052141>.

19. Сагін А.С., Сагін С.В. Експериментальне визначення оптимальних фаз подачі палива в циліндр судових дизелів // Водний транспорт. Збірник наукових праць. 2024. Вип. 1(39). С. 206-215. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.38.22.

20. Petrychenko O., Levinskyi M., Prytula D., Vynohradova A. Fuel options for the future: a comparative overview of properties and prospects // Transport Systems and Technologies. 2023. № 41. P. 96-106. <https://doi.org/10.32703/2617-9059-2023-41-8>.

21. Goolak S., Riabov I., Petrychenko O., Kyrychenko M., Pohosov O. The simulation model of an induction motor with consideration of instantaneous magnetic losses in steel // Advances in Mechanical Engineering. 2025. Vol. 17(2). <https://doi.org/10.1177/16878132251320236>.

22. Сагін С.В., Столярик Т.О. Динаміка судових дизелів під час використання моторних мастил з різними структурними характеристиками // Автоматизація судових технічних засобів : наук. -техн. зб. 2021. Вип. 27. С. 108-119. DOI: 10.31653/1819-3293-2021-1-27-108-119.

23. Sagin S.V., Kuropyatnyk O.A. Using exhaust gas bypass for achieving the environmental performance of marine diesel engines // Austrian Journal of Technical and Natural Sciences. Scientific journal. 2021. № 7-8. P. 36-43. <https://doi.org/10.29013/AJT-21-7.8-36-43>.

24. Budashko V., Sandler A., Shevchenko V. Diagnosis of the Technical Condition of High-tech Complexes by Probabilistic Methods // International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation. 2022. Vol. 16(1). P. 105-111. doi: 10.12716/1001.16.01.11.

25. Wang F., Zhao J., Li T., Guan P., Liu S., Wei H., Zhou L. Research on NOx Emissions Testing and Optimization Strategies for Diesel Engines Under Low-Load Cycles // Atmosphere. 2025. Vol. 16. P. 190. <https://doi.org/10.3390/atmos16020190>.

26. Levinskyi M. Automatic diagnostic of marine diesel generator lubricating oil condition // Автоматизація судових технічних засобів: наук.-техн. зб. 2023. Вип. 28. С. 106-120. DOI: 10.31653/1819-3293-2023-1-28-106-120.

27. Madey V. Assessment of the efficiency of biofuel use in the operation of marine diesel engines // Technology Audit and Production Reserves. 2022. Vol. 2(1(64)). P. 34-41. doi: <http://doi.org/10.15587/2706-5448.2022.255959>.

28. Melnyk O., Onyshchenko S., Onishchenko O., Lohinov O., Ocheretna V. Integral Approach to Vulnerability Assessment of Ship's Critical Equipment and Systems // Transactions on Maritime Science. 2023. Vol. 12(1). doi:10.7225/toms.v12.n01.002.

29. Мадей В.В. Використання в суднових дизелях паливних сумішей до складу яких входить паливо біологічного походження // Суднові енергетичні установки: наук.-техн. зб. 2022. Вип. 44. С. 93-110. doi: 10.31653/smf44.2022. 93-110.

30. Wang Z., Ma Q., Zhang Z., Li Z., Qin C.; Chen J., Peng C. A Study on Monitoring and Supervision of Ship Nitrogen-Oxide Emissions and Fuel-Sulfur-Content Compliance // Atmosphere. 2023. Vol. 14. P. 175. <https://doi.org/10.3390/atmos14010175>.

31. Двуліт З.П., Тимошук О.М., Левченко О.В. Вдосконалення бізнес-процесів сучасних судноплавних компаній в сфері міжнародних морських вантажних перевезень // Менеджмент та підприємництво в Україні: етапи становлення і проблеми розвитку. 2021. № 3 (1). С. 1-12. <http://doi.org/10.23939/smeu2021.01.001>.

32. Amoresano A., Langella G., Iodice P., Roscioli S. Numerical Analysis of SO₂ Absorption inside a Single Water Drop // Atmosphere. 2023. Vol. 14. P. 1746. <https://doi.org/10.3390/atmos14121746>.

33. Столярик Т.О. Забезпечення режимів мащення чотиритактних суднових дизелів // Автоматизація суднових технічних засобів: наук.-техн. зб. 2023. Вип. 28. С. 90 – 105. DOI: 10.31653/1819-3293-2023-1-28-90-105.

34. Melnyk O., Onyshchenko S., Onishchenko O. Development measures to enhance the ecological safety of ships and reduce operational pollution to the environment // Sci. J. Silesian Univ. Technol. 2023. Vol. 118. P. 195–206. <https://doi.org/10.20858/sjsutst.2023.118.13>.

35. Сагін С.В., Поповський О.Ю., Куропятник О.А. Особливості регулювання частоти обертання суднового дизеля під час використання системи вибіркового каталітичного відновлення // Водний транспорт. Збірник наукових праць. 2025. Вип. 2(43). С. 161-176. doi.org/10.33298/2226-8553.2025.2.43.14.

36. Сагін С.В., Поповський О.Ю., Куропятник О.А. Забезпечення швидкісних режимів роботи суднових дизелів, що використовують систему рециркуляції випускних газів // Водний транспорт. Збірник наукових праць. 2025. Вип. 2(43). С. 200-214. doi.org/10.33298/2226-8553.2025.2.43.17.

37. Kolegaev M., Brazhnik I. Improvement of the process of preparing cargo tanks of crude oil tankers for cargo operations // Technology Audit and Production Reserves. 2024. Vol. 6(1(80)). P. 36–40. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2024.318534>.

38. Куропятник О.А. Забезпечення екологічних показників суднових дизелів шляхом використання систем рециркуляції випускних газів високого тиску // Водний транспорт. Збірник наукових праць. 2024. Вип. 3(41). С. 121-132. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.3.41.14.

39. Солодовніков В.Г., Руснак Д.Ю. Використання ультразвукової обробки палива у паливних системах суднових середньообертових дизелів // Суднові енергетичні установки: наук.-техн. зб. 2024. Вип. 48. С. 126-136. [doi: 10.31653/smf48.2024.126-136](https://doi.org/10.31653/smf48.2024.126-136).

40. Руснак Д.Ю. Аналіз методів забезпечення вимог щодо емісії в атмосферу сірчистих сполук з випускними газами суднових дизелів // Водний транспорт. Збірник наукових праць. 2025. Вип. 1(42). С. 227-240. doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.25.

41. Руснак Д.Ю. Особливості комплектації суднових систем підготовки палива // Суднові енергетичні установки: наук.-техн. зб. 2024. Вип. 49. С. 98-109. [doi: 10.31653/smf49.2024.98-109](https://doi.org/10.31653/smf49.2024.98-109).

42. 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. [https://doi.org/10.48077/scihor.24\(11\).2021.9-19](https://doi.org/10.48077/scihor.24(11).2021.9-19).

43. Gorb S.I., Budurov M.I. Increasing the accuracy of a marine diesel engine operation limit by thermal factor // International Journal of Theoretical and Applied Mechanics. 2021. Vol. 6. P. 18-26.