

© Сагін С.В., Поповський О.Ю., Куропятник О.А.

## ОСОБЛИВОСТІ РЕГУЛЮВАННЯ ЧАСТОТИ ОБЕРТАННЯ СУДНОВОГО ДИЗЕЛЯ ПІД ЧАС ВИКОРИСТАННЯ СИСТЕМИ ВИБІРКОВОГО КАТАЛІТИЧНОГО ВІДНОВЛЕННЯ

Наведені результати досліджень щодо визначення особливостей регулювання частоти обертання суднового дизеля під час використання системи вибіркового каталітичного відновлення. Зазначено, що одним з варіантів забезпечення вимог Міжнародної конвенції МАРПОЛ щодо емісії оксидів азоту з випускними газами є використання систем вибіркового селективного очищення. Переведення дизеля з експлуатаційного режиму, яким не передбачалось використання системи вибіркового селективного очищення, на режим, в якому випускні гази піддаються очищенню за допомогою цієї системи, призводить до зміни зовнішнього навантаження на дизель, що є причиною зменшення його частоти обертання. Нехтування раптовим та стрибкоподібним збуренням, що виникає через введення в експлуатацію системи вибіркового каталітичного відновлення може призвести до критичного зменшення частоти обертання та відповідного зменшення крутного моменту дизеля. На деяких експлуатаційних режимах це може бути причиною зупинки дизеля та виникнення аварійної навігаційної ситуації. Моделювання динамічних режимів роботи під час використання системи вибіркового каталітичного відновлення виконувалось для суднового малообертового дизеля 5X72DF фірми WinGD та ізодромного астатичного регулятора. Математичне моделювання було виконано в програмному середовищі пакету комп'ютерної математики Matlab / Simulink. Як параметри налаштування ізодромного астатичного регулятора були обрані коефіцієнт підсилення за пропорційною складовою та час інтегрування інтегруючої компоненти. Як критерії оптимізації процесу регулювання були прийняти час регулювання та відносний динамічний закид частоти обертання. Шляхом математичного моделювання були встановлені оптимальні параметри налаштування регулятора: коефіцієнт підсилення за пропорційною складовою – 4,5 та час інтегрування інтегруючої компоненти – 0,125 с. При цьому забезпечуються найменші для всіх перехідних процесів час регулювання – 1,78 с та відносний динамічний закид частоти обертання – 12,2 %. Це забезпечує оптимальний процес виходу головного двигуна на новий сталлий режим під час переведення його на експлуатаційний режим з використанням системи вибіркового каталітичного відновлення.

**Ключові слова:** автоматичне регулювання частоти обертання, збурення, критерії оптимізації, математична модель, морський транспорт, навантаження, параметри налаштування регулятора, перехідний процес, регулювання, система вибіркового каталітичного відновлення, судновий дизель, чисельне моделювання, швидкісний режим суднового дизеля

**Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями.** Суднові дизелі під час забезпечення судна енергією забруднюють довкілля, перш за все це пов'язано з неминучим викидом в атмосферу випускних газів – кінцевого продукту процесу згоряння палива в циліндрі дизеля [1-3]. Більшість складових випускних газів відносяться до нетоксичних компонентів. Це продукти неповного згоряння палива – діоксид вуглецю  $\text{CO}_2$  і водяна пара  $\text{H}_2\text{O}$ , а також газова суміш зі зниженим вмістом кисню  $\text{O}_2$  (концентрація якого виключає займання залишків вуглеводнів) та атомарний азот  $\text{N}_2$ . Поруч з цим до складу випускних газів входять токсичні компоненти, найбільш шкідливими з яких є монооксид вуглецю  $\text{CO}$ , а також оксиди сірки  $\text{SO}_x$  і азоту  $\text{NO}_x$  [4-6].

Одним з варіантів зменшення концентрації оксидів азоту  $\text{NO}_x$  в випускних газах є їх вибіркове селективне очищення (Selective Catalytic Reduction – SCR), в разі використання якого газу спрямовуються в спеціальний колектор (SCR-реактор), в якому здійснюється їх очищення за допомогою спеціальних хімічних речовин [7-9]. В результаті хімічних реакцій, що перебігають в SCR-реакторі, оксиди азоту  $\text{NO}_x$  перетворюються в атомарний азот  $\text{N}_2$ . Таким чином суттєво (до 90...95 %) знижуються викиди оксидів азоту в довкілля. Системи SCR є найбільш ефективним способом очищення випускних газів від  $\text{NO}_x$  та забезпечують вимоги Додатку VI МАРПОЛ щодо попередження забруднення повітряного середовища з суден [10-12]. Також необхідно визначити, що використання систем SCR сприяє забезпеченню вимог Tier III, що висуваються для екологічних показників суден, побудованих після 01.01.2016 р.

З безумовними перевагами системи SCR пов'язані деякі недоліки. Одним з них є збільшення аеродинамічного опору в газопускній системі дизеля під час виконання вибіркового селективного очищення. Переведення дизеля з експлуатаційного режиму, яким не передбачалось використання системи SCR, на режим, в якому випускні гази потрапляють до SCR-реактору, призводить до зміни зовнішнього навантаження на дизель, що є причиною зменшення його частоти обертання [13-15]. Таким чином, введення в експлуатацію системи SCR вимагає регулювання швидкісного режиму роботи дизеля, а також вибору оптимальних режимів системи автоматичного регулювання частоти обертання.

Актуальність проблеми регулювання швидкісного режиму роботи дизеля пов'язана з забезпеченням ходових та маневрових якостей судна. Раптове стрибкоподібне зниження частоти обертання, або тривалий час регулювання дизеля з метою його повернення до заданого швидкісного режиму можуть викликати аварійні ситуації [16, 17], сприяти підвищенню рівню навігаційних небезпек [18, 19], бути першопричиною збільшення температурних [20, 21] та механічних [22, 23] навантажень на основні елементи дизеля [24, 25], гвинта [26, 27] та корпусу судна [28, 29].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Регулювання швидкісного режиму судових дизелів (головних – що передають потужність гребному гвинту за забезпечують рух судна, та допоміжних – таких, що є приводом судових електричних генераторів та в такій спосіб забезпечують роботу допоміжного, навігаційного та палубного обладнання) є обов'язковою складовою їх експлуатації [30-32]. Збільшення або зменшення частоти обертання головного двигуна впливає на його динамічне навантаження [33-35]. В разі збільшення частоти обертання під час експлуатації дизеля на номінальному режимі можлива його короткочасна робота за обмежувальною характеристикою [36-38]. При цьому система автоматичного регулювання зменшує циклову подачу палива, що відповідно до часу регулювання зменшую частоту обертання та призводить до повернення дизеля з області динамічного перенавантаження [39-41]. Під час зменшення частоти обертання автоматична система регулювання сприяє збільшенню циклової подачі палива та повертає в такий спосіб встановлений раніше експлуатаційний режим роботи дизеля [42-44]. Таким чином судові системи автоматичного регулювання швидкісного режиму судових дизелів як зовнішні збурення приймають зміну навантаження на гребний гвинт та корпус судна (перш за все хвилювання моря, динамічні навантаження з боку вітру, підводні течії) [45-47]. Одночасно з цим, таке зовнішнє збурення як збільшення аеродинамічного навантаження на газопускную систему (яке виникає під час переведення дизеля на експлуатаційний режим з використанням системи вибіркового каталітичного відновлення) не враховується та не регламентується інструкціями з експлуатації дизелів, що в деяких випадках може призвести до виникнення аварійних ситуацій та зменшенню надійності роботи дизеля та судового пропульсивного комплексу [48, 49].

**Формулювання цілей статті.** Ціллю статті є визначення оптимальних режимів експлуатації судової системи автоматичного регулювання швидкісного режиму роботи дизеля в разі використання системи вибіркового каталітичного відновлення випускних газів..

**Виклад основного матеріалу.** Дослідження виконувались на судні класу LNG Carrier вантажомісткістю 53480 м<sup>3</sup>. Як головний двигун на судні використовувався судовий малообертовий дизель 5X72DF фірми WinGD з номінальною потужністю 32950 кВт та номінальною частотою обертання колінчатого валу 86 об/хв.

З метою забезпечення вимог Додатку VI МАРПОЛ випускні гази суднового дизеля 5X72DF додатково очищувались в системі SCR. При цьому емісія оксидів азоту з випускними газами не перевищувала 3,4 г/(кВт·год), що відповідало рівню Tier III. В разі, коли випускні гази дизеля не піддавались додатковому очищенню, емісія оксидів азоту не перевищувала значення 14,4 г/(кВт·год), що відповідало рівню Tier II. Схема очищення випускних газів дизеля за допомогою системи SCR надана на рис. 1.

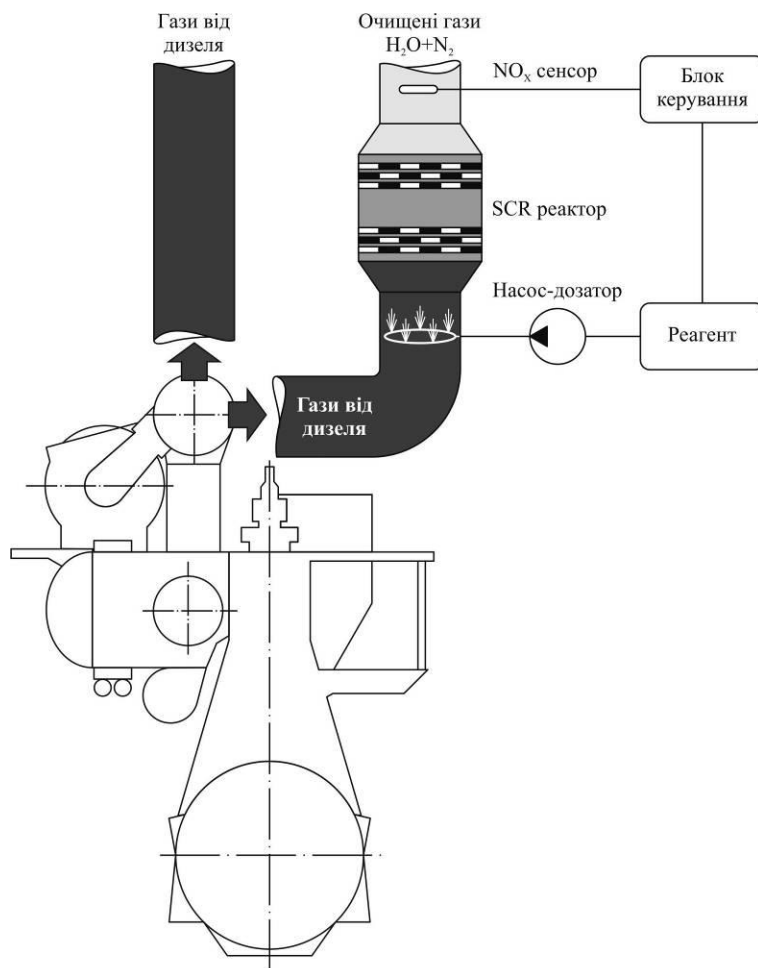


Рисунок 1 – Принципова схема очищення випускних газів суднового дизеля 5X72DF фірми WinGD від оксидів азоту за допомогою системи SCR

Розташування енергетичного обладнання, що забезпечує очищення випускних газів дизеля, в машинному відділенні судна наведено на рис. 2.



Рисунок 2 – Розташування обладнання, що забезпечує очищення випускних газів, в машинному відділенні судна

До складу автоматичної системи регулювання (АСР) швидкісного режиму роботи дизеля входили безпосередньо двигун 5X72DF (як об'єкт регулювання) та автоматичний електронний регулятор (який працював за ізодромним законом та був підключений у від'ємний зворотний зв'язок). Для аналізу роботи такої системи було потрібно розрахувати та проаналізувати перехідні процеси, що були викликані сигналом зовнішньої збурюючої дії, яка була прикладена до об'єкту регулювання (а саме – зміні аеродинамічного навантаження на дизель в разі його роботи з використанням системи вибіркового каталітичного відновлення SCR).

Зміна збурюючої дії з часом моделювалася східчастоподібною функцією Хевісайда:

$$\lambda(t) = \lambda_0 \cdot 1(t),$$

амплітуда цього сигналу дорівнювала одиниці –  $\lambda_0 = 1$ , а тривалість фронту зростання складала 0,1 с.

Розрахунок процесів зводився до пошуку розв'язання системи звичайних диференціальних рівнянь, які описують зміну з часом регульованої величини  $\varphi$  (за яку приймалась відносна частота обертання валу дизеля) та керуючої дії  $\mu$  (яка визначалась як відносна зміна циклової подачі палива в циліндр дизеля). Розрахунок проводився для безрозмірних величин, тобто величин взятих по відношенню до свого номінального значення.

Двигун, як об'єкт регулювання швидкісного режиму в першому наближенні і з нехтуванням його нелінійних властивостей, відповідав стійкій ланці першого порядку із позитивною величиною коефіцієнту саморегулювання та описувався диференціальним рівнянням

$$T_a \cdot \frac{d\varphi}{dt} + k_c \varphi = \mu - \lambda(t) \quad (1)$$

де значення характеристик об'єкту регулювання – постійної часу  $T_a$  та коефіцієнту саморегулювання  $k_c$  вибиралися такими, що відповідають результатам спостережень процесів в об'єкті.

Ізодромний астатичний регулятор описувався пропорційно-інтегруючим законом у вигляді:

$$\frac{d\mu}{dt} = \frac{1}{T_i} \cdot (v - \varphi) - k_p \cdot \frac{d\varphi}{dt}, \quad (2)$$

де  $k_p$  та  $T_i$  – варійовані параметри налаштування:

$k_p$  – коефіцієнт підсилення за пропорційною складовою регулятора, відн. од.;

$T_i$  – час інтегрування інтегруючої компоненти, с;

$v$  – величина уставки регулятора, яка визначала значення регульованої величини (під час проведення аналізу обиралися значення  $v = 1$ , що відповідало номінальному режиму роботи двигуна).

К конструктивні особливості побудови регулятора обумовили можливий діапазон зміни коефіцієнту підсилення за пропорційною складовою та час інтегрування інтегруючої компоненти у межах  $k_p \in [0,5 \dots 4,0]$  та  $T_i \in [0,1 \dots 0,5]$  с.

Система рівнянь повинна була розв'язуватися із додатковими початковими умовами  $\varphi(0) = v = 1$ ,  $\mu(0) = k_c \cdot \varphi(0)$ . Незважаючи на те, що записана система рівнянь є лінійною найбільш зручним є метод чисельного розв'язання за методом Дорманда-Принса 4 порядку. Чисельний розв'язок проводився шляхом візуального моделювання у програмному середовищі пакету комп'ютерної математики Matlab/Simulink. Динамічні ланки, що відповідали об'єкту регулювання і автоматичному регулятору склалися відповідно рівнянням (1) та (2), а врахування ненульових початкових умов визначило використання спеціальних блоків з розділу бібліотеки пакету Simulink Extras. Для візуальної гладкості функцій перехідних процесів крок інтегрування диференціальних рівнянь не перевищував величини 0,01 с.

Схема візуального моделювання представлена на рис. 3.

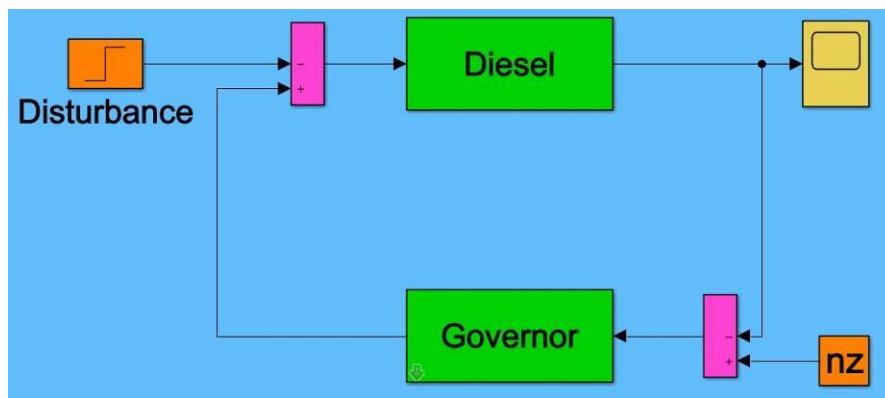


Рисунок 3 – Схема системи автоматичного регулювання частоти обертання валу дизеля

На рис. 3 позначені наступні елементи системи автоматичного регулювання:

- Disturbance – джерело збурюючої дії  $\lambda(t)$ , яка змінюється за східчастим законом;
- Diesel – об'єкт регулювання, вихідний сигнал якого (відносне значення швидкості обертання) є  $\varphi(t)$ ;
- Governor – автоматичний регулятор, вихідний сигнал якого (відносне значення керуючої дії) є  $\mu(t)$ ;
- nz – уставка регулятора  $v$  (у відносних одиницях швидкості  $nz=1$ ).

Налаштування режиму роботи АСР відбувалося шляхом покоординатної оптимізації, де як критерії оптимізації вибиралися час регулювання  $t_p$ , с та величина відносного динамічного закиду  $\sigma$ , %.

Варійованими параметрами були обрані параметри налаштування підромного регулятора – коефіцієнт підсилення за пропорційною складовою  $k_p$  та час інтегрування інтегруючої компоненти  $T_i$ .

На рис. 4-8 проілюстровані зміни у характеру перебігу перехідного процесу за умовою зміни величини часу інтегрування –  $T_i=0,5$  с (1-ий процес),  $T_i=0,375$  с (2-ий процес),  $T_i=0,25$  с (3-ий процес) та

$T_i=0,125$  с (4-ий процес). Кожному з комплексу перехідних процесів відповідає певна величина коефіцієнта підсилювання за пропорційною складовою  $k_p=0,5$  (рис. 4),  $k_p=1,0$  (рис. 5),  $k_p=1,5$  (рис. 6),  $k_p=2,0$  (рис. 7),  $k_p=4,0$  (рис. 8).

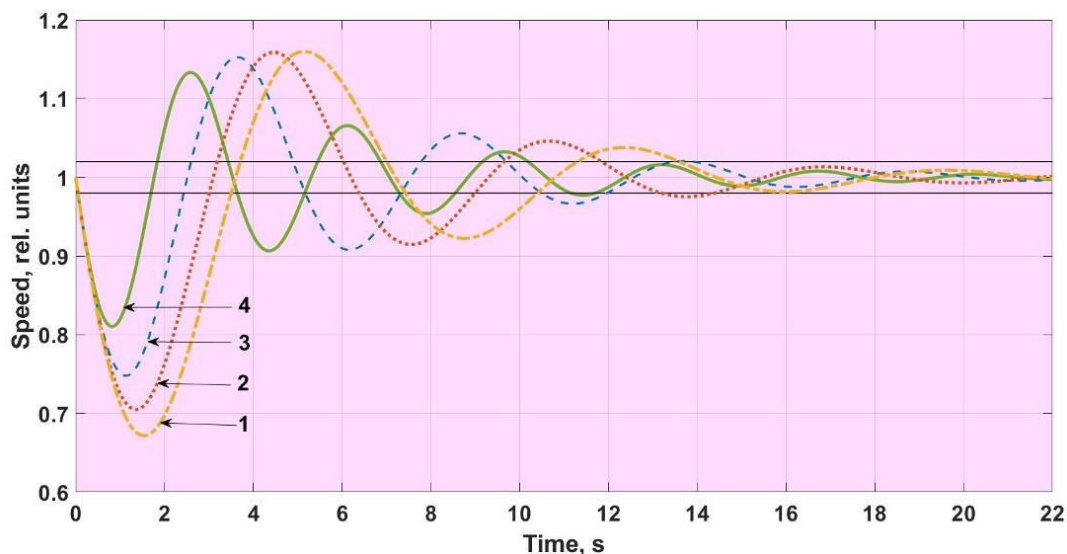


Рисунок 4 – Перехідні процеси для параметрів налаштування регулятора:

$k_p=0,5$  та 1 –  $T_i=0,5$  с; 2 –  $T_i=0,375$  с; 3 –  $T_i=0,25$  с; 4 –  $T_i=0,125$  с

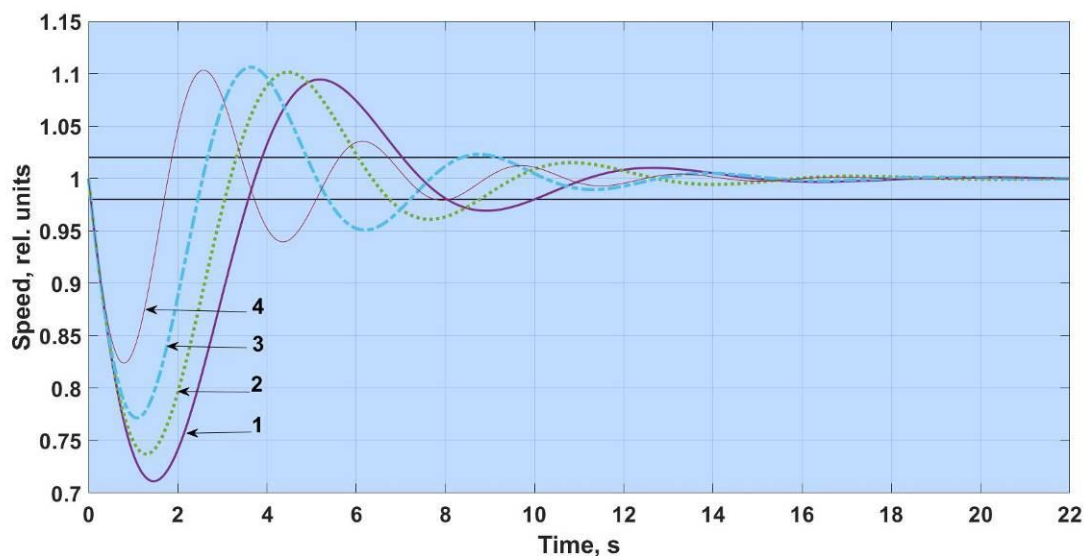


Рисунок 5 – Перехідні процеси для параметрів налаштування регулятора:

$k_p=1,0$  та 1 –  $T_i=0,5$  с; 2 –  $T_i=0,375$  с; 3 –  $T_i=0,25$  с; 4 –  $T_i=0,125$  с



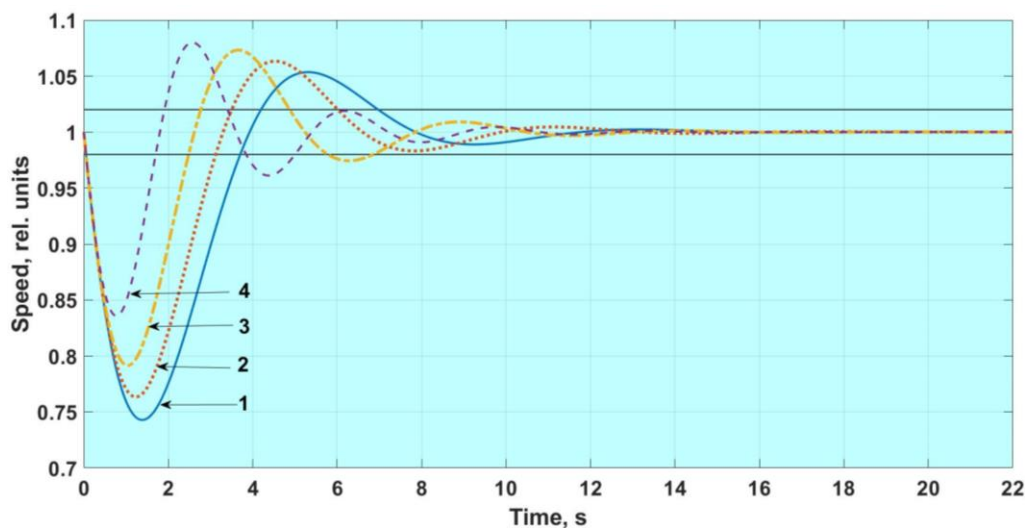


Рисунок 6— Перехідні процеси для параметрів налаштування регулятора:  
 $k_p=1,5$  та 1 –  $T_i=0,5$  c; 2 –  $T_i=0,375$  c; 3 –  $T_i=0,25$  c; 4 –  $T_i=0,125$  c

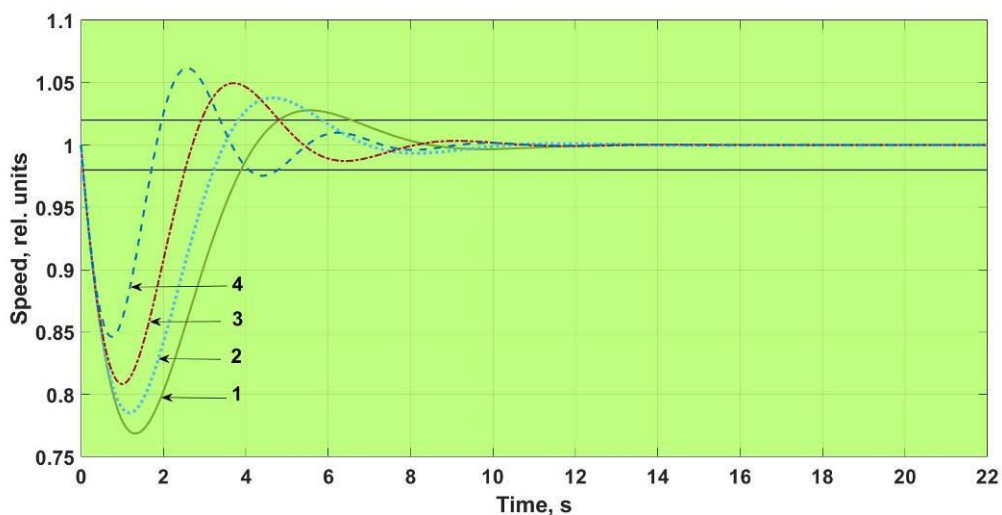


Рисунок 7— Перехідні процеси для параметрів налаштування регулятора:  
 $k_p=2,0$  та 1 –  $T_i=0,5$  c; 2 –  $T_i=0,375$  c; 3 –  $T_i=0,25$  c; 4 –  $T_i=0,125$  c

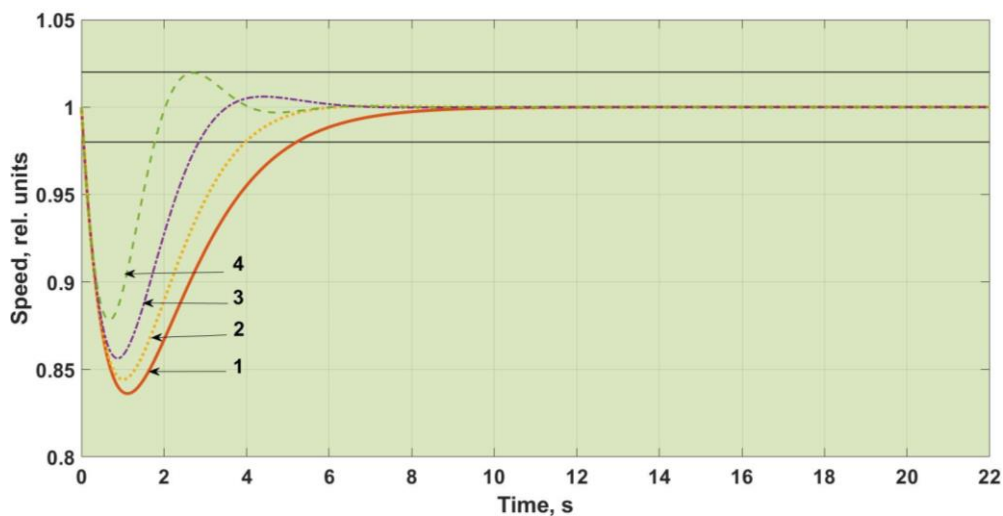


Рисунок 8— Перехідні процеси для параметрів налаштування регулятора:  
 $k_p=4,0$  та 1 –  $T_i=0,5$  c; 2 –  $T_i=0,375$  c; 3 –  $T_i=0,25$  c; 4 –  $T_i=0,125$  c

Результати визначення з графіків значень типових параметрів якості перехідних процесів, які водночас є критеріями оптимізації – часу регулювання  $t_p$  та відносного динамічного закиду  $\sigma$  зведені у таблицю 1.

Таблиця 1 – Критерії оптимальності для різних значень параметрів налаштування

| Параметри налаштування |           | Критерії оптимізації |           |
|------------------------|-----------|----------------------|-----------|
| $k_p$ , відн. од.      | $T_i$ , с | $\sigma$ , %         | $t_p$ , с |
| 0,5                    | 0,5       | 32,8                 | 16,02     |
|                        | 0,375     | 29,5                 | 14,40     |
|                        | 0,25      | 25,2                 | 12,05     |
|                        | 0,125     | 19,0                 | 11,76     |
| 1,0                    | 0,5       | 29,0                 | 10,02     |
|                        | 0,375     | 26,0                 | 8,82      |
|                        | 0,25      | 22,9                 | 9,13      |
|                        | 0,125     | 17,1                 | 8,29      |
| 1,5                    | 0,5       | 25,7                 | 6,16      |
|                        | 0,375     | 23,7                 | 6,01      |
|                        | 0,25      | 20,8                 | 6,92      |
|                        | 0,125     | 16,4                 | 5,03      |
| 2,0                    | 0,5       | 23,1                 | 6,53      |
|                        | 0,375     | 21,4                 | 5,80      |
|                        | 0,25      | 19,2                 | 4,79      |
|                        | 0,125     | 15,4                 | 4,82      |
| 4,0                    | 0,5       | 16,4                 | 5,21      |
|                        | 0,375     | 15,6                 | 3,96      |
|                        | 0,25      | 14,4                 | 2,85      |
|                        | 0,125     | 12,2                 | 1,78      |

Для кращої візуалізації результати моделювання також наведені на рис. 9 як діаграми, що відображають діапазон зміни критеріїв оптимізації (часу регулювання  $t_p$  та відносного динамічного закиду  $\sigma$ ) від параметрів налаштування (коефіцієнту підсилення за пропорційною складовою  $k_p$  та часу інтегрування інтегруючої компоненти  $T_i$ ).

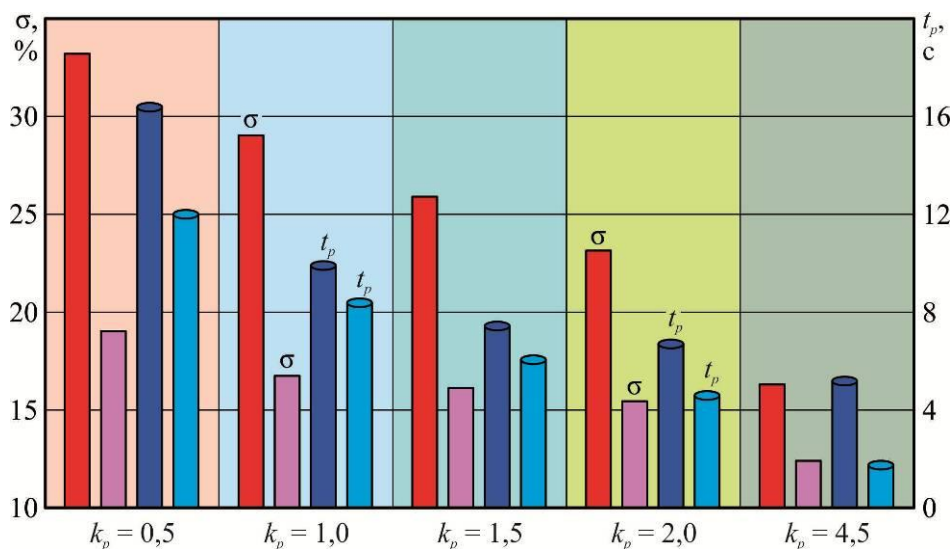


Рисунок 9 – Діапазон зміни критеріїв оптимізації (часу регулювання  $t_p$  та відносного динамічного закиду  $\sigma$ ) від параметрів налаштування (коефіцієнту підсилення за пропорційною складовою  $k_p$  та часу інтегрування інтегруючої компоненти  $T_i$ )



Об'ємна візуалізація наведених у таблиці 1 результатів проілюстрована на рис. 10, 11, на яких показана залежність динамічного закиду  $\sigma$  та часу регулювання від одночасної зміни параметрів налаштування у вигляді тривимірних графіків поверхонь функції.

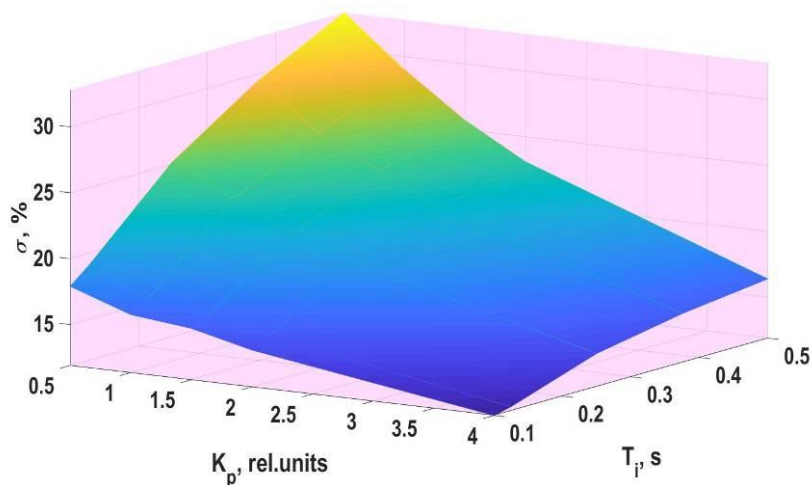


Рисунок 10 – Залежність величини динамічного закиду  $\sigma$  від параметрів налаштування регулятора

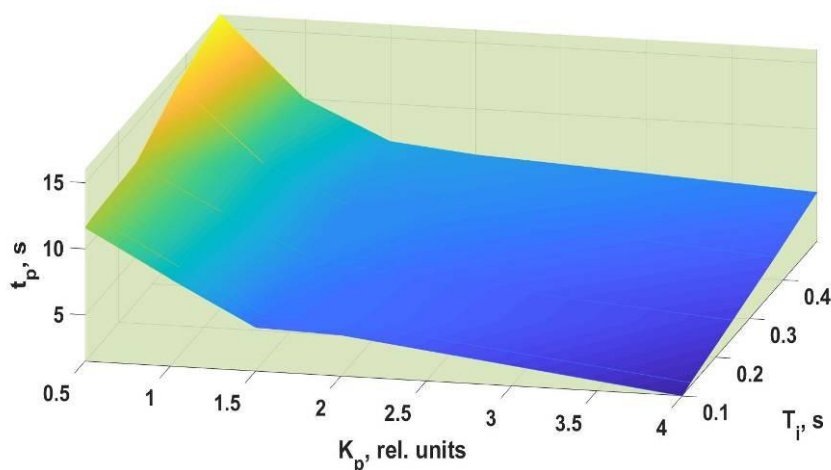


Рисунок 11 – Залежність величини часу регулювання  $t_p$  від параметрів налаштування регулятора

Наведені дані свідчать про тренд покращення якості перехідних процесів в АСР в цілому (з деякими незначними відхиленнями внаслідок коливального характеру перехідних процесів) пов'язаний із збільшенням коефіцієнту пропорційного підсилення та зменшенням часу інтегрування.

**Висновки.** Наведені результати досліджень дозволяють зробити наступні висновки.

1. Під час використання системи вибіркового каталітичного відновлення (що забезпечує зниження емісії оксидів азоту з випускними газами до рівню Tier III) через підвищення аеродинамічного опору збільшуються зовнішні збурення на судновий дизель. Це призводить до відхилення частоти обертання валу дизеля від встановленого завдання та сприяє виникненню перехідних процесів в автоматичній системі регулювання швидкісного режиму його роботи. Нехтування раптовим та стрибкоподібним збуренням, що виникає через введення в експлуатацію системи вибіркового каталітичного відновлення може призвести до критичного зменшення частоти обертання та відповідного зменшення крутного моменту дизеля. На деяких експлуатаційних режимах це може бути причиною зупинки дизеля та виникнення аварійної навігаційної ситуації.

2. Регулювання швидкісного режиму роботи дизеля здійснюється через зміну параметрів налаштування ізодромного астатичного регулятора, якими є коефіцієнт підсилення за

пропорційною складовою та час інтегрування інтегруючої компоненти. Як критерії оптимізації процесу регулювання доцільно використовувати час регулювання та відносний динамічний закид частоти обертання.

3. Шляхом математичного моделювання (що було виконано в програмному середовищі пакету комп'ютерної математики Matlab / Simulink) встановлені оптимальні параметри налаштування регулятора: коефіцієнт підсилення за пропорційною складовою – 4,5 та час інтегрування інтегруючої компоненти – 0,125 с. При цьому забезпечуються найменше значення часу регулювання – 1,78 с та величини відносного динамічного закиду частоти обертання – 12,2%. Це, у свою чергу, дає можливість відтворювати оптимальний процес виходу головного двигуна на новий сталий режим під час переведення його на експлуатацію з використанням системи вибіркового каталітичного відновлення.

## ЛІТЕРАТУРА

1. 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.
2. Sagin S.V., Kuropyatnyk O.O., Tkachenko I.V Ensuring the environmental friendliness of marine diesel engines of specialized ships // Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник. – 2022. – Вип. 45. – Одеса: НУ«ОМА». – С. 5-16. doi: 10.31653/smf45.2022.5-16.
3. Petrychenko O., Levynskyi M. Trends and preconditions for widespread adoption of liquefied natural gas in maritime transport // Transport systems and technologies. – 2024. – № 43. – С. 21-36. DOI:10.32703/2617-9059-2024-43-2.
4. Сагін С.В., Куропятник О.А. Аналіз впливу біодизельного палива на екологічні та економічні показники роботи судових дизелів // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2025. – Вип. 1(42). – С. 180-194. doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.21.
5. 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. – Одесса: НУ«ОМА». – С. 79-89.
6. Побережний Р.В., Сагін С.В. Забезпечення екологічних показників дизелів суден річкового та морського транспорту // Суднові енергетичні установки: наук. -техн. зб. – 2020. – Вип. 41. – Одеса: НУОМА. – С. 5-9. DOI: 10.31653/smf340.2020.5-9.
7. Sagin S., Kuropyatnyk O., Matieiko O., Razinkin R., Stoliaryk T., Volkov O. Ensuring operational performance and environmental sustainability of marine diesel engines through the use of biodiesel fuel // Journal of Marine Science and Engineering. – 2024. – Vol. 12(8). – P. 1440. https://doi.org/10.3390/jmse12081440
8. Сагін С.В., Сагін А.С. Контроль та діагностування надійності та економічності дизелів морських та річкових засобів транспорту // Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник. – 2023. – Вип. 46. – С. 118-131. doi: 10.31653/smf46.2023.118-131.
9. 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. – № 13. – P. 589. https://doi.org/10.3390/jmse1303058924.
10. Тимочко О.І., Левченко О.В., Руденко В.М., Сітков О.М. Використання гібридних роботизованих комплексів для інспекції морських нафтогазових об'єктів // Водний транспорт: Збірник наукових праць. – 2024. – Вип. 2(40). – С. 6-22. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.2.40.01.
11. Мадей В.В., Сагін С.В., Волков О.М. Управління процесом впорскування під час використання в судових дизелях паливних сумішей до складу яких входить паливо біологічного походження // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2024. – Вип. 1(39). – С. 193-205. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.1.39.20.

12. Руснак Д.Ю., Сагін С.В. Забезпечення екологічних вимог при ультразвуковій десульфурізації вуглеводних палив // Суднові енергетичні установки : наук.-техн. зб. – 2020. – Вип. 40. – Одеса : НУ«ОМА». – С. 49-54. DOI: 10.31653/smf340.2020.49-54.
13. Petrychenko O., Levinskyi M., Goolak S., Lukoševičius V. Prospects of Solar Energy in the Context of Greening Maritime Transport // Sustainability. – 2025. – № 17. – P. 2141. <https://doi.org/10.3390/su17052141>.
14. 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. DOI: 10.48077/scihor.24(11).2021.9-19.
15. 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. – Одеса: НУ«ОМА». – С. 108-119. DOI: 10.31653/1819-3293-2021-1-27-108-119.
16. Sagin S. V., Stoliaryk T. O. Comparative assessment of marine diesel engine oils // Austrian Journal of Technical and Natural Sciences. Scientific journal. – 2021. – № 7-8 (July – August). – P. 29-35. <https://doi.org/10.29013/AJT-21-7.8-29-35>.
17. Сагін С.В., Сагін С.С. Використання штучного інтелекту в ситуаціях надмірного зближення суден // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2024. – Вип. 1(39). – С. 215-225. [doi.org/10.33298/2226-8553.2024.1.39.22](https://doi.org/10.33298/2226-8553.2024.1.39.22).
18. Левченко О.В. Синтез варіантів дій судноводія у небезпечних ситуаціях з урахуванням часових та ресурсних обмежень у судових СППР // Водний транспорт: Збірник наукових праць. – 2021. – Вип. 3(34). – С. 89-98. [doi.org/10.33298/2226-8553/2021.3.34.10](https://doi.org/10.33298/2226-8553/2021.3.34.10).
19. Сагін С.В., Сагін С.С. Визначення методу управління рухом суден морського транспорту під час забезпечення їх безпечного розходження // Водний транспорт: Збірник наукових праць. – 2023. – Вип. 2(38). – С. 187-198. [doi.org/10.33298/2226-8553/2023.2.38.20](https://doi.org/10.33298/2226-8553/2023.2.38.20).
20. Сагін С.В., Бондар С.А., Столярик Т.О. Оцінка безвідмовності судових 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](https://doi.org/10.33298/2226-8553.2023.1.37.06).
21. Сагин С.В., Заблоцкий Ю.В. Влияние анизотропных жидкостей на работу узлов трения судовых дизелей // Проблемы техники : наук.-виробн. журнал. – 2012. – № 4. – Одесса : ОНМУ. – С. 68-81.
22. Сагін С.В., Заблоцький Ю.В. Діагностування технічного стану судових енергетичних установок засобів водного транспорту // Водний транспорт. – 2023. – № 2(38). – С. 164-175. [doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.38.18](https://doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.38.18).
23. Сагин С. В. Повышение надежности работы прецизионных пар топливной аппаратуры судовых дизелей за счет использования органических покрытий // Вісник Одеськ. нац. мор. ун-ту. – 2018. – Вип. 4(57). – С. 109-120.
24. Levinskyi M. Automatic diagnostic of marine diesel generator lubricating oil condition // Автоматизація судових технічних засобів: наук.-техн. зб. – 2023. – Вип. 28. – Одеса: НУ «ОМА». – С. 106-120. DOI: 10.31653/1819-3293-2023-1-28-106-120.
25. Сагин С.В., Мацкевич Д.В. Оптические характеристики граничных смазочных слоев масел, применяемых в циркуляционных системах судовых дизелей // Судовые энергетические установки: науч.-техн.сб. – 2011. – № 26. – С.116-125.
26. Левінський М.В., Левінський В.М. Вибір параметрів системи стабілізації курсу судна при дії водно-хвильових збурень // Автоматизація судових технічних засобів : наук.-техн. зб. – 2020. – Вип. 26. – С.27-40. DOI: 10.31653/1819-3293-2020-1-26-27-40.
27. Дакі О.А., Пліта Л.Л., Трофименко І.В., Федунів В.М. Особливості та вимоги щодо навігаційного забезпечення безпеки судноводіння на внутрішніх судноплавних шляхах // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2022. – Вип. 2(36). – С. 184-194. [doi.org/10.33298/2226-8553.2022.2.36.15](https://doi.org/10.33298/2226-8553.2022.2.36.15).
28. Petrychenko O.O., Levinskyi M.N., Prytula D.A., Vynohradova A.S. Fuel options for the future: a comparative overview of properties and prospects // Transport Systems and Technologies. – 2023. – № 41. – P. 96–106. DOI: <https://doi.org/10.32703/2617-9059-2023-41-8>.
29. Сагин С.В., Заблоцкий Ю.В., Перунов Р.В. Технология использования и результаты испытаний присадок к топливам для судовых дизелей // Проблемы техники: наук.-виробн. журнал. – 2012. – № 3. – Одесса: ОНМУ. – С. 84-103.

30. 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>.
31. 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>.
32. Сагин С.В., Заблоцкий Ю.В. Определение триботехнических характеристик поверхностей по степени упорядоченности пристенных слоев углеводородных жидкостей // *Проблеми техніки : наук.-виробн. журнал*. – 2011. – № 3. – Одеса: ОНМУ. – С. 78-88. doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.08.
33. Сагин С.В., Поповский Ю.М., Гребенюк М.Н. Влияние ориентационной упорядоченности в граничных смазочных слоях на триботехнические характеристики узлов трения // *Судовые энергетические установки: науч.-техн. сб.* – 1998. – Вып. 1. – Одеса: ОГМА. – С.102-104.
34. Сагін С.С., Сагін С.В. Забезпечення безпеки маневрування великотоннажних суден в стиснених портових водах // *Водний транспорт. Збірник наукових праць*. – 2024. – Вип. 3(41). – С. 208-220. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.3.41.21.
35. 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.
36. 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.
37. Sagin S.V., Karianskyi S., Sagin S.S., Volkov O., Zablotskyi Y., Fomin O., Pišt'ek V., Kučera P. Ensuring the safety of maritime transportation of drilling fluids by platform supply-class vessel // *Applied Ocean Research*. – 2023. – Vol. 140. – P. 103745. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2023.103745>.
38. 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.
39. Gorb S., Popovskii A., Budurov M. Adjustment of speed governor for marine diesel generator engine // *International Journal of GEOMATE*. – 2023. – Vol. 25. – N 109. – Pp. 125-132. DOI: <https://doi.org/10.21660/2023.109.m2312>.
40. Поповский А.Ю., Сагин С.В. Комплексная оценка эксплуатационных характеристик смазочных углеводородных жидкостей // *Автоматизация судовых технических средств : науч.-техн. сборник*. – 2014. – Вып. 20. – С. 74-83.
41. Сагин С. В. Определение диапазона стратификации вязкости смазочного материала в трибологических системах судовых дизелей // *Вісник Одеськ. нац. мор. ун-ту*. – 2019. – Вип. 1(58). – С. 89-100.
42. Сагин С.В. Реология моторных масел при режимах пуска и реверса судовых малооборотных дизелей // *Universum: Технические науки*. – 2018. – Вып. 3(48). – С. 67-71.
43. 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. – № 13. – P. 146. <https://doi.org/10.3390/lubricants13040146>.
44. Марченко О.О., Сагін С.В. Вдосконалення процесу очищення суднових важких палив // *Суднові енергетичні установки: науково-технічний збірник*. – 2020. – Вип. 41. – Одеса: НУ«ОМА». – С. 10-14. DOI: 10.31653/smf341.2020.10-14.
45. Зверьков Д.О., Сагін С.В. Зниження механічних втрат у суднових дизелях // *Суднові енергетичні установки: наук.-техн. зб.* – 2020. – Вип. 40. – С. 20-25. DOI : 10.31653/smf341.2020.20-25.
46. Sagin S.V. Decrease in mechanical losses in high-pressure fuel equipment of marine diesel engines // *Materials of the International Conference “Scientific research of the SCO countries: synergy and integration”* – 2019. – P. 139–145. DOI: 10.34660/INF.2019.15.36258.

47. 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>.
48. Petrychenko O., Levynskyi 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>.
49. Сагін С.В., Заблоцький Ю.В., Сагін А.С. Підвищення економічності роботи суднових середньообертових дизелів // *Водний транспорт. Збірник наукових праць.* – 2025. – Вип. 1(42). – С. 166-179. [doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.20](https://doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.20).

## REFERENCES

1. Sagin S.V., Kuropyatnyk O.A. Determination of optimal modes of exhaust gas control processes for marine diesel engines // *Water transport.* – 2024. – № 1(39). – P. 173–185. [doi.org/10.33298/2226-8553.2024.2.40.16](https://doi.org/10.33298/2226-8553.2024.2.40.16).
2. Sagin S.V., Kuropyatnyk O.O., Tkachenko I.V. Ensuring the environmental friendliness of marine diesel engines of specialized ships // *Ship power plants.* – 2022. – № 45. – P. 5–16. [doi: 10.31653/smf45.2022.5-16](https://doi.org/10.31653/smf45.2022.5-16).
3. Petrychenko O., Levynskyi M. Trends and preconditions for widespread adoption of liquefied natural gas in maritime transport // *Transport systems and technologies.* – 2024. – № 43. – С. 21-36. [DOI:10.32703/2617-9059-2024-43-2](https://doi.org/10.32703/2617-9059-2024-43-2).
4. Sagin S.V., Kuropyatnyk O.A. Analysis of the impact of biodiesel fuel on the environmental and economic performance of marine diesel engines // *Water transport.* – 2025. – Вип. 1(42). – С. 180-194. [doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.21](https://doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.21).
5. Sagin S.V., Kuropyatnyk O.A. Optimization of operating modes of the exhaust gas bypass system of marine medium-speed diesel engines // *Automation of ship facilities.* – 2019. – № 25. – P. 79-89.
6. Poberezhniy R.V., Sagin S.V. Ensuring the environmental performance of diesel engines in river and sea transport vessels // *Ship power plants.* – 2020. – Vol. 41. – P. 5-9. [DOI: 10.31653/smf340.2020.5-9](https://doi.org/10.31653/smf340.2020.5-9).
7. Sagin S., Kuropyatnyk O., Matieiko O., Razinkin R., Stoliaryk T., Volkov O. Ensuring operational performance and environmental sustainability of marine diesel engines through the use of biodiesel fuel // *Journal of Marine Science and Engineering.* – 2024. – Vol. 12(8). – P. 1440. <https://doi.org/10.3390/jmse12081440>
8. Sagin S.V., Sagin A.S. Control and diagnosis of reliability and economy of diesel engines of sea and river means of transport // *Ship power plants.* – 2023. – Vol. 46. – P. 118-131. [doi: 10.31653/smf46.2023.118-131](https://doi.org/10.31653/smf46.2023.118-131).
9. 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. – № 13. – P. 589. <https://doi.org/10.3390/jmse1303058924>.
10. Tymochko O.I., Levchenko O.V., Rudenko V.M., Sitkov O.M. Use of hybrid robotic complex for inspection of marine oil and gas facilities // *Water transport.* – 2024. – Vol. 2(40). – P. 6-22. [doi.org/10.33298/2226-8553.2024.2.40.01](https://doi.org/10.33298/2226-8553.2024.2.40.01).
11. Madey V.V., Sagin S.V., Volkov O.M. Direction of the injection process during the use of fuel mixture that include fuel of biological origin in marine diesel engines // *Water transport.* – 2024. – Vol. 1(39). – P. 193-205. [doi.org/10.33298/2226-8553.2024.1.39.20](https://doi.org/10.33298/2226-8553.2024.1.39.20).
12. Rusnak D.Y., Sagin S.V. Ensuring environmental requirements during ultrasonic desulfurization of hydrocarbon fuels // *Ship power plants.* – 2020. – Vol. 40. – P. 49-54. [DOI: 10.31653/smf340.2020.49-54](https://doi.org/10.31653/smf340.2020.49-54).
13. Petrychenko O., Levynskyi M., Goolak S., Lukoševičius V. Prospects of Solar Energy in the Context of Greening Maritime Transport // *Sustainability.* – 2025. – № 17. – P. 2141. <https://doi.org/10.3390/su17052141>.
14. Gorb S., Levynskyi M., Budurov M. Sensitivity optimisation of a main marine diesel engine electronic speed governor // *Scientific Horizons.* – 2021. – Vol. 24(11). – P. 9-19. [DOI: 10.48077/scihor.24\(11\).2021.9-19](https://doi.org/10.48077/scihor.24(11).2021.9-19).

15. Sagin S.V., Stoliaryk T.O. Dynamics of marine diesel engines when using motor oils with different structural characteristics // Automation of ship facilities. – 2021. – № 27. – P. 108-119. DOI: 10.31653/1819-3293-2021-1-27-108-119.
16. Sagin S. V., Stoliaryk T. O. Comparative assessment of marine diesel engine oils // Austrian Journal of Technical and Natural Sciences. Scientific journal. – 2021. – № 7-8 (July – August). – P. 29-35. <https://doi.org/10.29013/AJT-21-7.8-29-35>.
17. Sagin S.S., Sagin S.V. Use of artificial intelligence in the situations of excessive vessels approaching // Water Transport. – 2024. – №. 1(39). – P. 215-225. [doi.org/10.33298/2226-8553.2024.1.39.22](https://doi.org/10.33298/2226-8553.2024.1.39.22).
18. Levchenko O. Synthesis of vessels' options in dangerous situations taking into account time and resource restrictions in vessel DSS. // Water transport. – 2021. – № 3(34). – P. 89-98. [doi.org/10.33298/2226-8553/2021.3.34.10](https://doi.org/10.33298/2226-8553/2021.3.34.10).
19. Sagin S.V., Sagin S.S., Determination of the method of controlling the movement of marine transport vessels while ensuring their safe divergences // Water transport. – 2023. – № 2(38). – C. 187-198. [doi.org/10.33298/2226-8553/2023.2.38.20](https://doi.org/10.33298/2226-8553/2023.2.38.20).
20. 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](https://doi.org/10.33298/2226-8553.2023.1.37.06).
21. Sagin S.V., Zablotsky Yu.V. The influence of anisotropic fluids on the operation of friction units of marine diesel engines // Problems of technical. – 2012. – Vol. 4. – P. 68-81.
22. Sagin S.V., Zablotsky Yu.V. Development of a method for diagnosing the technical condition of elements of the main power plant of water transport // Water transport. – 2023. – Vol. 2(38). – P. 164-175. [doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.38.18](https://doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.38.18).
23. Sagin S.V. Increasing the reliability of precision pairs of marine diesel fuel equipment through the use of organic coatings // Herald of the Odessa National Maritime University. – 2018. – № 4(57). – P. 109–120.
24. Levinskyi M. Automatic diagnostic of marine diesel generator lubricating oil condition // Automation of ship technical facilities. – 2023. – № 28. – P. 106-120. DOI: 10.31653/1819-3293-2023-1-28-106-120
25. Sagin S.V., Matskevych D.V. Optical characteristics of boundary lubricating layers of oils used in circulation systems of marine diesel engines // Ship power plants. – 2011. – Vol. 26. – P. 116-125.
26. Levinskyi M.V., Levinskyi V.M. Choosing the structure and parameters of vessel's course automatic control system under the influence of water-wave disturbances // Automation of ship technical facilities. – 2020. – Вип. 26. – С.27-40. DOI: 10.31653/1819-3293-2020-1-26-27-40.
27. Daki O.A., Plita L.L., Trofymenko I.V., Fedunov V.M. Feature and requirements for navigational safety of navigation on inland waterways // Water transport. – 2022. – № 2(36). – P. 184-194. [doi.org/10.33298/2226-8553.2022.2.36.15](https://doi.org/10.33298/2226-8553.2022.2.36.15).
28. Petrychenko O.O., Levinskyi M.N., Prytula D.A., Vynohradova A.S Fuel options for the future: a comparative overview of properties and prospects // Transport Systems and Technologies. – 2023. – № 41. – P. 96–106. DOI: <https://doi.org/10.32703/2617-9059-2023-41-8>.
29. Sagin S.V., Zablotsky Yu.V., Perunov R.V. Technology of use and test results of fuel additives for marine diesel engines // Problems of technical. – 2012. – Vol. 3. – P. 84-103.
30. 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](https://doi.org/10.15587/2706-5448.2023.290198).
31. 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](https://doi.org/10.15587/2706-5448.2023.286039).
32. Sagin S.V., Zablotsky Y.V. Determination of tribological characteristics of surfaces by the degree of ordering of wall layers of hydrocarbon liquids // Problems of technical. – 2011. – Vol. 3. – P. 78-88.
33. Sagin S.V., Popovskii Y.M., Grebenuk M.N. The influence of orientation ordering in boundary lubricant layers on the tribological characteristics of friction units // Ship power plants. – 1998. – Vol. 1. – P. 102-104.
34. Sagin S.S., Sagin S.V. Ensuring the safe maneuvering of large-tonnage vessels in confined port waters // Water transport. – 2024. – № 3(41). – C. 208-220. [doi.org/10.33298/2226-8553.2024.3.41.21](https://doi.org/10.33298/2226-8553.2024.3.41.21).



35. Levchenko O.V., Hannoshyna I.M., Ostupchuk T.V. Information support system for decision-making processes on the bridge of a ship // *Water transport*. – 2025. – № 1(42). – P. 24–27. doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.04.
36. 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.
37. Sagin S.V., Karianskyi S., Sagin S.S., Volkov O., Zablotskyi Y., Fomin O., Pišt'ek V., Kučera P. Ensuring the safety of maritime transportation of drilling fluids by platform supply-class vessel // *Applied Ocean Research*. – 2023. – Vol. 140. – P. 103745. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2023.103745>.
38. Levchenko O.V., Maranov O.V. Integration of combined decision support systems to ensure navigational safety and optimize vessel traffic in port areas // *Water transport*. – 2025. – № 1(42). – P. 99–108. doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.14.
39. 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. DOI: <https://doi.org/10.21660/2023.109.m2312>.
40. Popovskii A.Y., Sagin S.V. Complex assessment of operational characteristics of lubricating hydrocarbon liquids // *Automation of ship facilities*. – 2014. – №20. – P. 74–83.
41. Sagin S.V. Determination of the range of lubricant viscosity stratification in tribological systems of marine diesel engines // *Herald of the Odessa National Maritime University*. – 2019. – № 1(58). – P. 89–100.
42. Sagin S.V. Rheology of motor oils in start-up and reverse modes of marine low-speed diesel engines // *Universum: Technical sciences*. – 2018. – № 3(48). – P. 67–71.
43. 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. № 13. – P. 146. <https://doi.org/10.3390/lubricants13040146>.
44. Marchenko O.O., Sagin S.V. Improving the process of cleaning marine heavy fuels // *Ship power plants*. – 2020. – Vol. 41. – P. 10–14. DOI: 10.31653/smf340.2020.10-14.
45. Zverkov D.O., Sagin S.V. Reduction of mechanical losses in marine diesel engines // *Ship power plants*. – 2020. – № 41. – P. 20–25. DOI: 10.31653/smf341.2020.20-25.
46. Sagin S.V. Decrease in mechanical losses in high-pressure fuel equipment of marine diesel engines // *Materials of the International Conference “Scientific research of the SCO countries: synergy and integration”* – 2019. – P. 139–145. DOI: 10.34660/INF.2019.15.36258.
47. 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>.
48. 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>.
49. Sagin S.V., Zablotskyi Y.V., Sagin A.S. Increasing the efficiency of ship's medium-speed diesel engines // *Water transport*. – 2025. – Вип. 1(42). – С. 166–179. doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.20.

***Sagin S.V., Popovskii O.Y., Kuropyatnyk O.A.***

## **FEATURES OF REGULATING THE SPEED OF A MARINE DIESEL ENGINE WHEN USING A SELECTIVE CATALYTIC REDUCTION SYSTEM**

The results of research on determining the features of regulating the rotational speed of a ship's diesel engine when using a selective catalytic reduction system are presented. It is noted that one of the options for ensuring the requirements of the International MARPOL Convention on the emission of nitrogen oxides with exhaust gases is the use of selective catalytic systems. Transferring a diesel engine from an operating mode that did not provide for the use of a selective selective purification system to a mode in which exhaust gases are purified using this system leads to a change in the external load on the diesel engine, which is the cause of a

decrease in its rotational speed. Neglecting sudden and abrupt disturbances that arise due to the commissioning of a selective catalytic reduction system can lead to a critical decrease in the rotational speed and a corresponding decrease in the diesel engine torque. In some operating modes, this can cause the diesel engine to stop and cause an emergency navigation situation. Modeling of dynamic operating modes when using the selective catalytic reduction system was performed for the 5X72DF marine low-speed diesel engine from WinGD and the isodromic astatic regulator. Mathematical modeling was performed in the Matlab / Simulink computer mathematics package software environment. The gain coefficient for the proportional component and the integration time of the integrating component were selected as the tuning parameters of the isodromic astatic regulator. The regulation time and the relative dynamic overshoot of the rotational speed were taken as the optimization criteria of the regulation process. By means of mathematical modeling, the optimal parameters of the regulator tuning were established: the gain coefficient for the proportional component – 4.5 and the integration time of the integrating component – 0.125 s. At the same time, the smallest regulation time for all transient processes – 1.78 s and the relative dynamic overshoot of the rotational speed – 12.2 % are provided. This ensures the optimal process of the main engine entering a new steady state when transferring it to the operational mode using the selective catalytic reduction system.

**Keywords:** *automatic speed control, controller settings, disturbances, high-speed mode of marine diesel load, marine diesel, marine transport, mathematical model, numerical simulation, optimization criteria, regulation, selective catalytic reduction system, transient process.*

*Стаття прийнята 19.03.2025*