

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

ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ШВИДКІСНИХ РЕЖИМІВ РОБОТИ СУДНОВИХ ДИЗЕЛІВ, ЩО ВИКОРИСТОВУЮТЬ СИСТЕМУ РЕЦИРКУЛЯЦІЇ ВИПУСКНИХ ГАЗІВ

Наведені результати досліджень щодо забезпечення швидкісних режимів роботи суднових дизелів, які використовують систему рециркуляції випускних газів. Зазначено, що систем рециркуляції випускних газів низького та високого тиску відносяться до способів, що сприяють виконанню вимог Міжнародної конвенції МАРПОЛ відносно забруднення атмосфери оксидами азоту. Зазначено, що у системах рециркуляції низького і високого тиску кількість випускних газів, що повертають до циліндра дизеля, може досягати 15...20 % від їх загального обсягу. Це призводить до погіршення процесу згоряння та зниження пікових температур в циліндрі дизеля. При цьому з одного боку зменшують кількість оксидів азоту, що утворюється під час згоряння палива, з іншого – уповільнюють процес розширення газів. Це викликає зменшення крутного моменту та ефективної потужності дизеля та призводить до необхідності збільшення циклової подачі палива. Таким чином, зменшення кількості кисню, що потрапляє до циліндру дизелю в складі газоповітряної суміші, стає причиною додаткового зовнішнього збурення на систему автоматичного регулювання його частоти обертання. Через це ціллю статті було визначення оптимальних режимів роботи системи автоматичного регулювання частоти обертання суднового дизеля під час стрибкоподібних експлуатаційних навантажень в системі рециркуляції випускних газів. Дослідження виконувались шляхом моделювання відповідних процесів рециркуляції випускних газів та регулювання частоти обертання колінчатого валу для суднового малообертового дизеля 8G60ME фірми MAN Diesel, обладнаного системою рециркуляції газів високого тиску. До системи автоматичного регулювання були включені дизель 8G60ME та регулятор, що забезпечує пропорційно-інтегральний закон регулювання. Моделювання виконувалось для трьох різних відносних навантажень 1,0; 0,75; 0,5, що відповідало 20 %, 15 % та 10 % ступеню рециркуляції випускних газів. Зміна параметрів налаштування регулятора обривалась в діапазоні: коефіцієнт підсилення за пропорційною складовою (0,5...2,5) з кроком зміни 1,0; час інтегрування (0,2...1,0) с з кроком зміни 0,4 с. Це дозволили визначити оптимальні режими, за якими спостерігається перебіг перехідних процесів з найменшим часом регулювання та найменшим закидом частоти обертання.

Ключові слова: випускні гази, емісія оксидів азоту, збурення, критерії оптимізації, математична модель, морський транспорт, навантаження, параметри налаштування регулятора, перехідний процес, регулювання, система автоматичного регулювання частоти обертання, система рециркуляції випускних газів, судновий дизель, чисельне моделювання, швидкісний режим суднового дизеля

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями. Двигуні внутрішнього згоряння / дизелі займають в суднової енергетики домінуюче положення в порівнянні з іншими типами теплових двигунів – паровими котлами та газовими турбінами. Перш за все це пов'язано з найменшою питомою витратою палива та найбільшим коефіцієнтом корисної дії, що характерні саме для дизелів [1-3]. Дизелі, що встановлюються на судах морського та внутрішнього водного транспорту, виконують функції головних та допоміжних двигунів, забезпечуючи рух судна та роботу суднових систем, механізмів та обладнання [4-6]. Отримання корисної роботи та ефективної потужності в суднових дизелях неможливо без спалювання в їхніх циліндрах

рідкого палива нафтового походження [7-9]. При цьому в результаті його згоряння в атмосферу викидаються випускні гази. Більшу частину випускних газів (до 99,0...99,2 %) складають нейтральні та нетоксичні компоненти – продукти неповного згоряння (більшою частиною яких є діоксид вуглецю CO_2 і водяна пара H_2O) та повітря зі зниженим вмістом кисню [10-12]. Невелику решту зі загальної частини випускних газів складають токсичні компоненти, які поділяються на дві групи. До першої групи відносяться продукти неповного згоряння палива – монооксид вуглецю CO , вуглеводні C_nH_m , альдегіди R-CHO та сажа C . Токсичні компоненти другої групи утворюються в результаті повного окислення хімічних елементів, що входять до складу палива та повітря – це оксиди азоту NO_x та сірки SO_x . Суднові ДВЗ, що знаходяться в експлуатації, вимагають постійного пошуку ефективних способів зниження токсичності випускних газів, насамперед викидів оксидів азоту NO_x [13-15]. Вміст оксидів азоту в випускних газах регламентується вимогами Annex VI Міжнародної конвенції MARPOL та залежить від року побудови судна та частоти обертання валу дизеля (табл. 1) [16-19].

Таблиця 1 – Максимальна концентрація оксидів азоту (NO_x , г/кВт-год) в випускних газах судових дизелів відповідно до вимог Annex VI MARPOL

| Рівень | Частоти обертання валу, об/хв | | |
|--|-------------------------------|------------------|------------|
| | $n < 130$ | $130 < n < 2000$ | $n > 2000$ |
| Tier I – для суден, збудованих після 2000 р. | 17,0 | $45n^{-0,2}$ | 9,8 |
| Tier II – для суден, збудованих після 2011 р. | 14,4 | $44n^{-0,23}$ | 7,7 |
| Tier III – для суден, збудованих після 2016 р. | 3,4 | $9n^{-0,2}$ | 2,0 |

Забезпечення вимог Tier I, Tier II можливо шляхом додаткової підготовки палива (наприклад, його гомогенізації, ультразвукової обробки та виготовлення водопаливних емульсій) та вдосконаленням робочого циклу (наприклад, управління фазами подачі повітря, випуску газів та впорскування палива). Забезпечення вимог Tier III можливо лише через використання додаткових технічних систем та пристроїв. Найбільш розповсюдженими з них є: система очищення випускних газів – Selective Catalytic Reduction (SCR); системи рециркуляції – Exhaust Gas Recirculation (EGR); система перепуску – Exhaust Gas Wastegate (EWR) [20-22].

В разі використання системи EGR частина випускних газів повертається до циліндру дизеля. При цьому у випадку, коли випускні гази спрямовують до циліндра після газотурбонагнітача (тобто коли вони втратили більшу частину енергії та тиску на лопатках газової турбіни) системи рециркуляції називають низького тиску [23-25]. В разі, коли випускні гази повертають до циліндра ще до їхнього потрапляння на лопатки газотурбонагнітача (тобто коли вони ще характеризуються тиском, з яким виходять з випускного колектора) системи рециркуляції називають високого тиску [26-28]. Обидві системи використовуються на дизелях суден морського транспорту та встановлюється незалежно від призначення або потужності дизеля [29-32].

Переваги системи рециркуляції низького тиску:

- проста конструкція газоходів і скрубера, зважаючи на порівняно низький тиск і низьку температуру випускних газів (порівняно з системою рециркуляції високого тиску);
- низька потужність додаткового газового нагнітача, з огляду на те, що випускні гази під час рециркуляції спрямовуються не в продувний ресивер (як у системі рециркуляції високого тиску), а в компресор газотурбонагнітача.

При цьому, компоненти системи низького тиску мають більш великі геометричні розміри ніж в системі високого тиску (у зв'язку з тим, що за умовою низького тиску випускних газів пропорційно збільшується їх об'єм).

Система рециркуляції високого тиску (порівняно із системою низького тиску) відрізняється більшою компактністю – високий тиск сприяє меншому питомому об'єму випускних газів. Однак, з огляду, як на високий тиск, так і високу температуру газів, скрубера, що забезпечує їх очищення, зазнає великі температурні і гідравлічні навантаження, тому має більш складну конструкцію. Крім того, з огляду на те, що в системі рециркуляції високого тиску випускні гази надходять безпосередньо в ресивер продувного повітря, потужність газового нагнітача повинна забезпечувати такий самий високий тиск,

як і основний повітряний компресор газотурбонагнітача. Також необхідно відзначити, що висока температура випускних газів зобов'язує використовувати додатковий охолоджувач, це ускладнює конструкцію системи рециркуляції високого тиску [33-35].

У системах рециркуляції низького і високого тиску кількість випускних газів, що повертають до циліндра дизеля, може досягати 15...20 % від їх загального обсягу [36-38]. Це призводить до погіршення процесу згоряння та зниження пікових температур в циліндрі дизеля. При цьому з одного боку зменшують кількість оксидів азоту, що утворюється під час згоряння палива, з іншого – уповільнюють процес розширення газів. Це викликає зменшення крутного моменту та ефективної потужності дизеля та призводить до необхідності збільшення циклової подачі палива. Таким чином, зменшення кількості кисню, що потрапляє до циліндру дизеля в складі газоповітряної суміші, стає причиною додаткового зовнішнього збурення на систему автоматичного регулювання (САР) його частоти обертання.

Нехтування явищем зменшення крутного моменту в разі використання системи EGR може призвести до виникнення аварійних ситуацій. Особливу актуальність це набуває в разі стрибкоподібної та максимальної зміни кількості випускних газів, що повертаються в циліндр дизеля системою EGR. Саме в цих випадках спостерігається найбільше зниження крутного моменту дизеля та саме ці випадки потребують миттєвого регулювання на зміну частоти обертання дизеля.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Регулювання частоти обертання колінчатого валу судових дизелів є обов'язковою складовою їх експлуатації [39, 40].

Підтримання частоти обертання в разі зовнішніх або внутрішніх збурень може виконуватися за статичним або астатичним принципом [41, 42]. В першому випадку САР встановлює новий швидкісний режим роботи дизеля, якій може відрізнитися від попереднього. При цьому відхилення у значенні частоти обертання для нового сталого режиму від попереднього може досягати 3...5 %. В разі астатичного регулювання САР встановлює заданий швидкісний режим без будь якого відхилення частоти обертання валу дизеля. В разі статичного регулювання до складу САР включають автоматичні регулятори, що забезпечують пропорційний закон регулювання. В разі астатичного регулювання використовуються пропорційно-інтегральні регулятори. Проектування САР здійснюється для умов, в яких як зовнішні збурення очікуються зміна навантаження на гребний гвинт та корпус судна [43-45]. Ці збурення призводять до збільшення опору. Що надається з боку гребного гвинта на судовий дизель [46-47]. Одночасно з цим не враховується, таке зовнішнє збурення як збільшення кількості випускних газів, що повертаються в циліндр дизеля системою EGR. При цьому це навантаження також призводить до зменшення крутного моменту та частоти обертання дизеля [48, 49].

Підтримання частоти обертання в встановленому діапазоні значень забезпечуються САР шляхом зміни кількості палива, що подається в циліндр дизеля. Несвоєчасно реагування на зміну складу газоповітряної суміші, що спрямовується в циліндр дизеля системою EGR, може стати причиною миттєвого критичного зниження частоти обертання дизеля та його зупинки. Виникнення подібної ситуації в акваторіях інтенсивного руху (в каналах, вузькостях, прибережних районах та портах) може викликати наслідки та стати погрозою довікллю та життю людини [50-52].

Формулювання цілей статті. Ціллю статті є визначення оптимальних режимів роботи системи автоматичного регулювання частоти обертання судового дизеля під час стрибкоподібних експлуатаційних навантажень в системі рециркуляції випускних газів.

Виклад основного матеріалу. Дослідження виконувались на судовому малообертовому дизелі 8G60ME фірми MAN Diesel, обладнаному системою рециркуляції газів високого тиску – HP-EGR. Принципова схема системи рециркуляції випускних газів високого тиску судового малообертового дизеля 8G60ME фірми MAN Diesel надана на рис. 1.

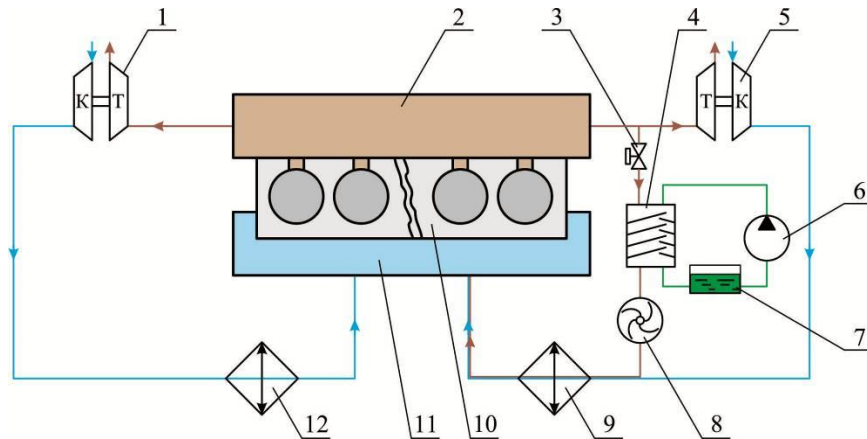


Рисунок 1 – Принципова схема системи рециркуляції випускних газів високого тиску суднового малооборотового дизеля 8G60ME фірми MAN Diesel:

1, 5 – газотурбонагнітач; 2 – випускний колектор; 3 – керуючий клапан системи рециркуляції випускних газів високого тиску; 4 – скруббер; 6 – насос подачі прісної води в систему очищення та охолодження випускних газів; 7 – цистерна прісної води системи очищення та охолодження випускних газів; 9, 12 – охолоджувач наддувального повітря;

10 – судновий дизель; 11 – продувний ресивер; Т, К – газова турбіна та повітряний компресор газотурбонагнітачів

Система працює в такий спосіб. Випускні гази з циліндрів дизеля 10 надходять у загальний випускний колектор 2 і далі до газотурбонагнетачів 1 і 5, після чого через газувипускную трубу видаляються в атмосферу. Газотурбонагнітачі 1 і 5 забирають повітря з машинного відділення та після стиснення спрямовують його через охолоджувачі 9 і 12 в повітряний (продувний) ресивер 11. При цьому газотурбонагнітач 5 обладнаний системою рециркуляції випускних газів високого тиску, до складу якої входять керуючий клапан 3, скруббер очищення газів 4, цистерна 7 прісної води системи очищення та охолодження випускних газів та насос 6 подачі прісної води в систему очищення та охолодження випускних газів. Під час експлуатації системи рециркуляції випускних газів високого тиску їх кількість, що повертається через систему очищення до продувного ресиверу та циліндрів дизеля, регулюється клапаном 3. Випускні гази очищуються і попередньо охолоджуються в скруббері 4, після чого додатковим нагнітачем 8 подаються на змішування з повітрям (що надходить з повітряного компресору газотурбонагнітувача 5) і далі прямують до продувного ресиверу 11. Відповідно до технічних характеристик системи EGR, що встановлена на дизелі, можливий діапазон зніми ступені рециркуляції випускних газів знаходився в межах 0...20 % та регулювався за допомогою клапана рециркуляції, встановленого у випускній магістралі (позиція 3 на рис. 1).

Як вказувалось раніше, використання системи EGR надає збурюючу дію на САР частоти обертання дизеля та призводить до відхилення частоти обертання від встановленого завдання. Для аналізу характеру дії зовнішнього навантаження на замкнену САР частоти обертання дизеля (що складається з об'єкта регулювання та автоматичного регулятора, який підключений у від'ємний зворотний зв'язок до об'єкту) було виконано чисельне моделювання та визначені оптимальні параметри налаштування регулятора. Як об'єкт регулювання був прийнятий судновий двигун (дизель), для якого головним завданням регулювання є стабілізація частоти (швидкості) обертання колінчатого валу. В зв'язку з цим вихідним сигналом об'єкту є відносне значення швидкості, де одиничному значенню відповідає номінальний режим обертання.

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:

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

де значення характеристик об'єкту регулювання – часу розгону T та коефіцієнту підсилення k вибиралися згідно експериментальним спостереженням, навантаження (сигнал збурюючої дії) моделювалося сходинко-подібною функцією із можливістю варіювання висоти сходинки та тривалості фронту зростання (останнє значення дорівнювало 0,1 с).

В САР використався ізодромний астатичний регулятор з можливістю роздільного варіювання параметрів налаштування. Зміна з часом вихідного сигналу регулятора – відносного значення регулюючої дії визначалося як розв'язок інтегрального рівняння

$$\mu(t) = - \left[\frac{1}{T_i} \cdot \int_0^t (\varphi(t') - v) \cdot dt' + k_p \cdot \varphi(t) \right], \quad (2)$$

де v – значення уставки регулятора.

Система інтегрально-диференціальних рівнянь розв'язувалася чисельно (із додатковими ненульовими початковими умовами $\varphi(0)=v$ 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 вітворюємої функції). Врахування ненульових початкових умов забезпечувалося використанням спеціальних блоків з пакету Simulink Extras.

Схема візуального моделювання представлена на рис. 2.

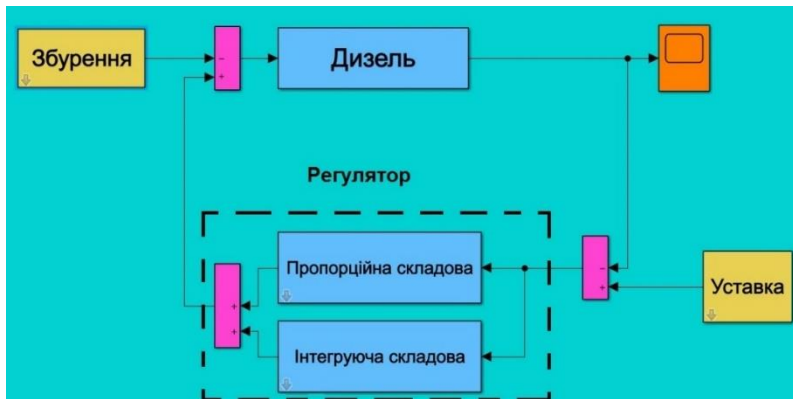


Рисунок 2 – Візуалізація САР частоти обертання колінчатого валу дизеля

На рис. 2 позначені наступні елементи САР:

- 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);
- уставка – блок завдання значення відносної швидкості обертання двигуна (у відносних одиницях) з можливістю зміни режиму; значення уставки $v=1$ відповідає номінальному режиму роботи двигуна.

Моделювання виконувалося для трьох різних відносних навантажень – $f_0=1,0$; $f_0=0,75$; $f_0=0,5$, що відповідало 20 %, 15 % та 10 % ступеню рециркуляції випускних газів. Зміна параметрів налаштування регулятора обирались в діапазоні: коефіцієнт підсилення за пропорційною складовою $k_p=[0,5\dots 2,5]$ з кроком зміни $\Delta k_p=1,0$; час інтегрування $T_i=[0,2\dots 1,0]$ с з кроком зміни $\Delta T_i=0,4$ с.

Налаштування режиму роботи САР відбувалося шляхом поелементної 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. 3-5.

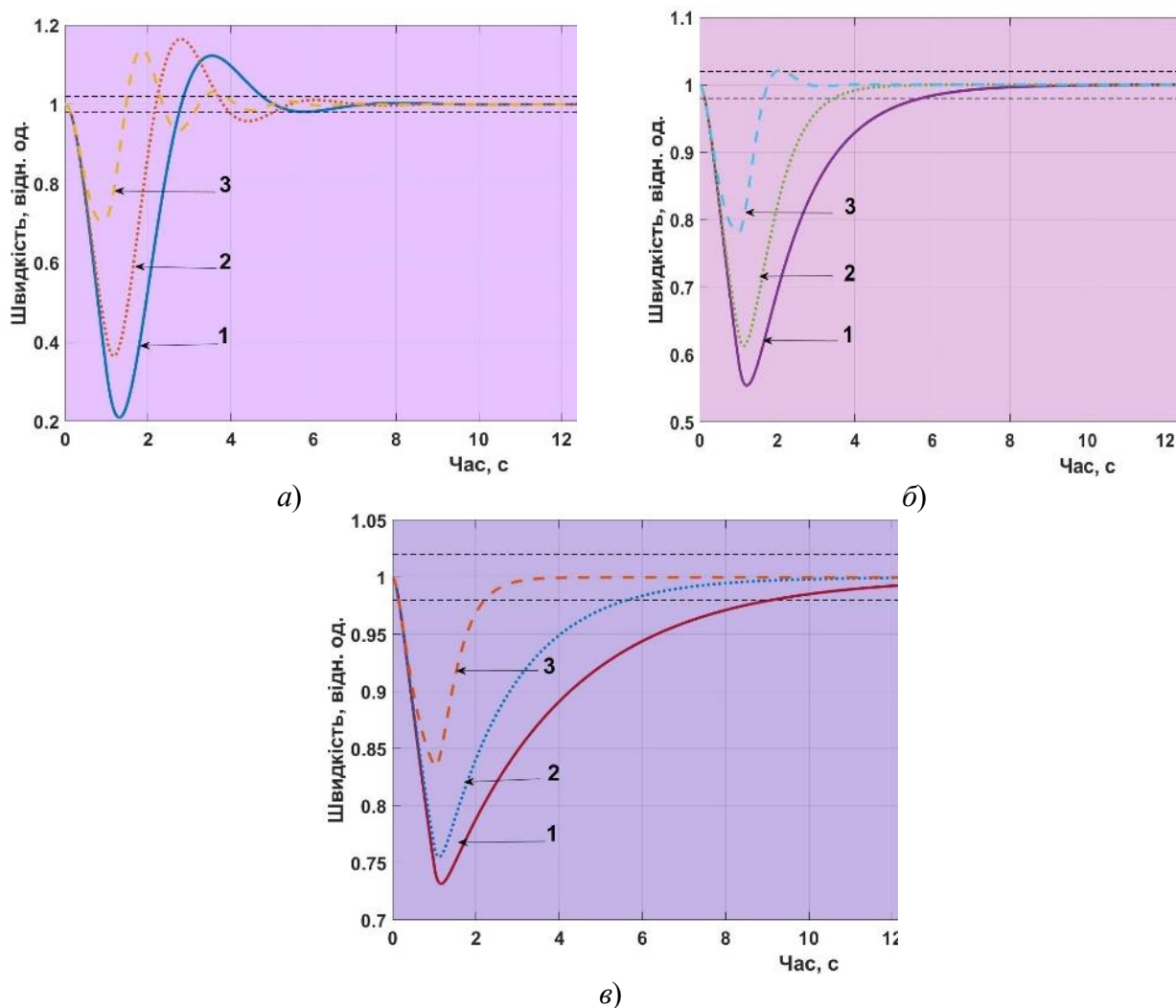
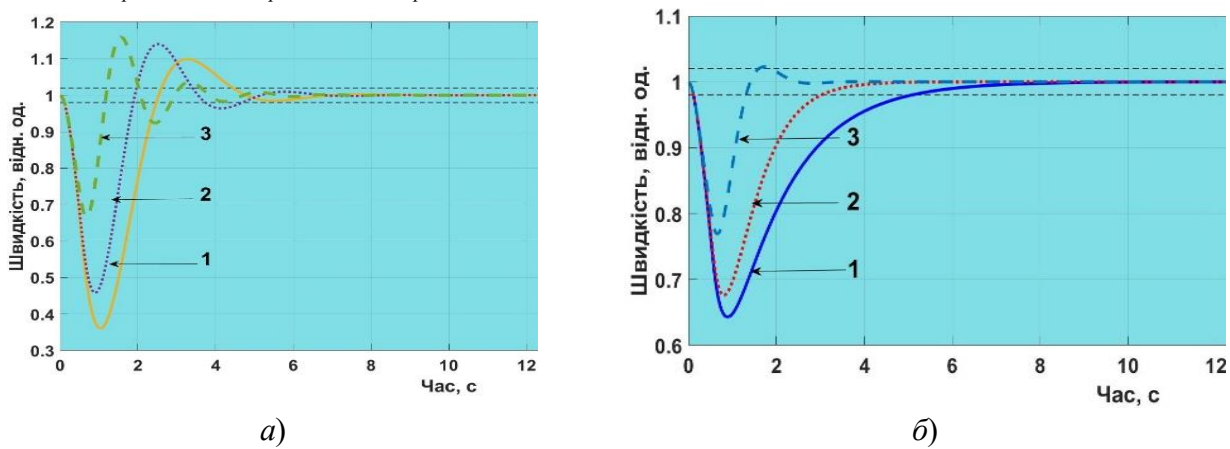
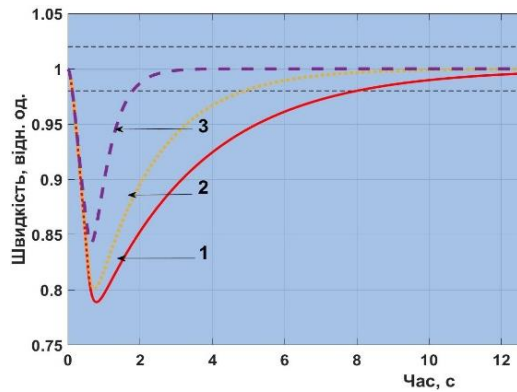


Рисунок 3 – Перехідні процеси в САР частоти обертання колінчатого валу дизеля.

Рівень навантаження (відносно значення сигналу збурення) $f_0=1,0$:

$a - k_p=0,5$; $б - k_p=1,5$; $в - k_p=2,5$; $1 - T_i=1,0$ с; $2 - T_i=0,6$ с; $3 - T_i=0,2$ с



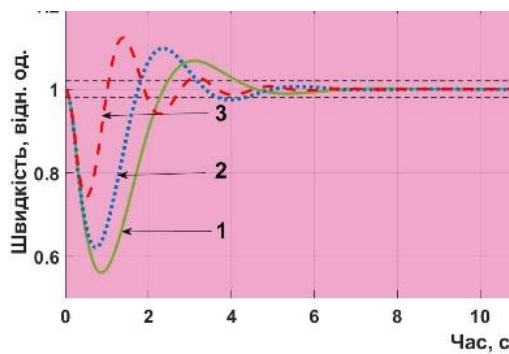


в)

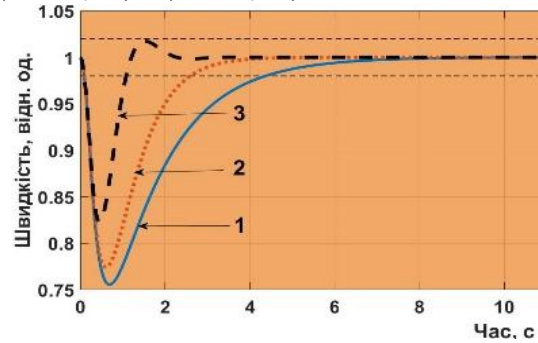
Рисунок 4 – Перехідні процеси в САР частоти обертання колінчатого валу дизеля.

Рівень навантаження (відносно значення сигналу збурення) $f_0=0,75$:

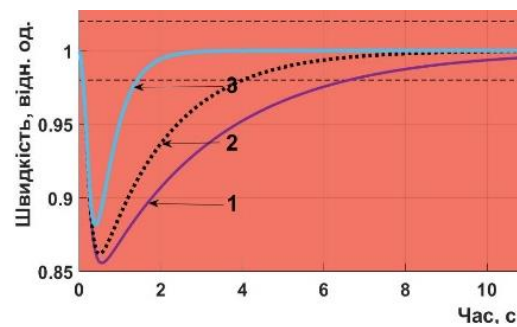
$a - k_p=0,5$; $б - k_p=1,5$; $в - k_p=2,5$; $1 - T_i=1,0$ с; $2 - T_i=0,6$ с; $3 - T_i=0,2$ с



а)



б)



в)

Рисунок 5 – Перехідні процеси в САР частоти обертання колінчатого валу дизеля.

Рівень навантаження (відносно значення сигналу збурення) $f_0=0,5$:

$a - k_p=0,5$; $б - k_p=1,5$; $в - k_p=2,5$; $1 - T_i=1,0$ с; $2 - T_i=0,6$ с; $3 - T_i=0,2$ с

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

Результати, що наведені в табл. 2, свідчать, що для покращення якості перехідних процесів в САР в цілому (з деякими незначними відхиленнями внаслідок коливального характеру перехідних процесів) слід зупинитися на значеннях $k_p=1,5$ та $T_i=0,2$ с. Для цих значень час регулювання (в залежності від рівня навантаження) знаходиться у межах – $t_p=(1,08...2,28)$ с, а відносне динамічне закидання – у межах $\sigma=(17,7...21,7)$ %.

Таблиця 2 – Якість регулювання для різних значень параметрів налаштувань регулятора

| Відносне навантаження f_0 | Параметри налаштування | | Параметри оптимізації | |
|-----------------------------|------------------------|-----------|-----------------------|-----------|
| | k_p , відн. од. | T_i , с | σ , % | t_p , с |
| 1,0 | 0,5 | 1,0 | 79,0 | 6,00 |
| | | 0,6 | 63,5 | 5,02 |
| | | 0,2 | 29,0 | 3,87 |
| | 1,5 | 1,0 | 43,6 | 5,67 |
| | | 0,6 | 38,6 | 3,54 |
| | | 0,2 | 21,8 | 2,28 |
| | 2,5 | 1,0 | 26,8 | 9,01 |
| | | 0,6 | 24,6 | 5,65 |
| | | 0,2 | 17,3 | 2,21 |
| 0,75 | 0,5 | 1,0 | 64,0 | 4,41 |
| | | 0,6 | 54,0 | 4,70 |
| | | 0,2 | 32,9 | 3,63 |
| | 1,5 | 1,0 | 35,7 | 5,00 |
| | | 0,6 | 32,4 | 3,02 |
| | | 0,2 | 22,8 | 1,31 |
| | 2,5 | 1,0 | 18,7 | 7,98 |
| | | 0,6 | 19,9 | 4,92 |
| | | 0,2 | 15,6 | 1,80 |
| 0,5 | 0,5 | 1,0 | 43,9 | 4,15 |
| | | 0,6 | 37,5 | 4,37 |
| | | 0,2 | 25,7 | 3,40 |
| | 1,5 | 1,0 | 24,5 | 4,40 |
| | | 0,6 | 22,4 | 2,60 |
| | | 0,2 | 17,7 | 1,08 |
| | 2,5 | 1,0 | 14,4 | 6,58 |
| | | 0,6 | 13,7 | 4,02 |
| | | 0,2 | 11,7 | 1,46 |

Висновки. Наведені результати досліджень дозволяють зробити наступні висновки.

1. Під час використання системи рециркуляції випускних газів (що забезпечує зниження викидів в атмосферу оксидів азоту газами до рівню Tier III) здійснюється уповільнення процесу розширення газів. Це викликає зменшення крутного моменту та ефективної потужності дизеля та призводить до необхідності збільшення циклової подачі палива. Таким чином, зменшення кількості кисню, що потрапляє до циліндру дизелю в складі газоповітряної суміші, стає причиною додаткового зовнішнього збурення на систему автоматичного регулювання його частоти обертання. 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 використання системи рециркуляції випускних газів 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. Завдання забезпечення якості стабілізації частоти обертів роботи дизеля 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 процесі – 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 – 1,5 та обернений коефіцієнт пропорційності (час інтегрування) за інтегруючою складовою – 0,2 с. При цьому забезпечуються найменші значення критеріїв оптимальності. В залежності від рівня зовнішнього навантаження вони знаходилися у наступних діапазонах час регулювання – $t_p=(1,08 \dots 2,28)$ с та величина відносного перерегулювання – $\sigma=(17,7 \dots 21,7)$ %. Це, у свою чергу, забезпечує оптимальний процес виходу швидкісного режиму головного двигуна на новий сталий режим з використанням системи вибіркового каталітичного відновлення.

ЛІТЕРАТУРА

1. 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.
2. Petrychenko O., Levinskyi 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.
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. Сагін С.В., Заблоцький Ю.В., Сагін А.С. Підвищення економічності роботи суднових середньооборотних дизелів // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2025. – Вип. 1(42). – С. 166-179. doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.20.
5. Сагін С.В., Сагін С.С. Визначення методу управління рухом суден морського транспорту під час забезпечення їх безпечного розходження // Водний транспорт. – 2023. – № 2(38). – С. 187-197. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.38.19.
6. 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.
7. 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.
8. 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.
9. 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.
10. Сагін С.В., Куропятник О.А. Аналіз впливу біодизельного палива на екологічні та економічні показники роботи суднових дизелів // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2025. – Вип. 1(42). – С. 180-194. doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.21.
11. 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.
12. 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/10.33298/2226-8553.2024.1.39.20.
13. Petrychenko O., Levynskiy 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. Сагін С.В., Куропятник О.А. Визначення оптимальних режимів експлуатації суднових двигунів внутрішнього згоряння під час використання біодизельного палива // Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник. – 2024. – Вип. 48. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 100-113. doi: 10.31653/smf48.2024.100-113.
15. Sagin S.V., Karianskyi S., Sagin S.S., Volkov O., Zablotskyi Y., Fomin O., Pířtěk V., Kuřcera 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>.
16. Сагін 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.
17. 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>
18. 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.
19. 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>.
20. Сагін С.В., Куропятник О.А. Визначення оптимальних режимів процесів управління випускними газами суднових дизелів // Водний транспорт: Збірник наукових праць. – 2024. – Вип. 2(40). – С. 173-185. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.2.40.16.
21. 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>.
22. Сагін С.В. Реология моторных масел при режимах пуска и реверса судовых малооборотных дизелей // Universum: Технические науки. – 2018. – Вып. 3(48). – С. 67-71.
23. Сагін С.В., Столярик Т.О. Динаміка суднових дизелів під час використанні моторних мастил з різними структурними характеристиками // Автоматизація суднових технічних засобів : наук. -техн. зб. – 2021. – Вип. 27. – Одеса: НУ«ОМА». – С. 108-119. DOI: 10.31653/1819-3293-2021-1-27-108-119.
24. 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>.
25. 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.
26. Сагін С.В., Заблоцький Ю.В. Діагностування технічного стану суднових енергетичних установок засобів водного транспорту // Водний транспорт. – 2023. – № 2(38). – С. 164-175. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.38.18.
27. Левінський М.В., Левінський В.М. Вибір параметрів системи стабілізації курсу судна при дії водно-хвильових збурень // Автоматизація суднових технічних засобів : наук.-техн. зб. – 2020. – Вип. 26. – С.27-40. DOI: 10.31653/1819-3293-2020-1-26-27-40.
28. 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.

29. 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.
30. 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.
31. 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.
32. Левченко О.В. Синтез варіантів дій судноводія у небезпечних ситуаціях з урахуванням часових та ресурсних обмежень у суднових СППР // Водний транспорт: Збірник наукових праць. – 2021. – Вип. 3(34). – С. 89-98. doi.org/10.33298/2226-8553/2021.3.34.10.
33. 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.
34. Сагин С.В., Заблоцкий Ю.В., Перунов Р.В. Технология использования и результаты испытаний присадок к топливам для судовых дизелей // Проблеми техніки: наук.-виробн. журнал. – 2012. – № 3. – Одеса: ОНМУ. – С. 84-103.
35. 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.
36. 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.
37. Звєрьков 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.
38. 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.
39. Levinskyi M. Automatic diagnostic of marine diesel generator lubricating oil condition // Автоматизація суднових технічних засобів: наук.-техн. зб. – 2023. – Вип. 28. – Одеса: НУ «ОМА». – С. 106-120. DOI: 10.31653/1819-3293-2023-1-28-106-120.
40. 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.
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. 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.
43. 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>.
44. 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>.
45. 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>.

46. 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.
47. 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.
48. Sagin S., Sagin A., Zablotskiy 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.
49. 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/10.33298/2226-8553.2024.1.39.21.
50. Сагін 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.
51. 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.
52. 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.

REFERENCES

1. 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.
2. Petrychenko O., Levynskiy 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.
3. 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.
4. Sagin S.V., Zablotskiy 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.
5. 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). – P. 187–197. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.38.19.
6. 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.
7. 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.
8. Popovskii A.Y., Sagin S.V. Complex assessment of operational characteristics of lubricating hydrocarbon liquids // Automation of ship facilities. – 2014. – №20. – P. 74-83.
9. Petrychenko O., Levynskiy 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.
10. 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.
11. 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.

12. 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.
13. Petrychenko O., Levynskiy 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. Sagin S.V., Kuropyatnyk O.A. Determining the optimal operating modes of marine internal combustion engines when using biodiesel fuel // *Ship power plants*. – 2011. – Vol. 48. – P. 100-113. doi: 10.31653/smf48.2024.100-113.
15. Sagin S.V., Karianskyi S., Sagin S.S., Volkov O., Zablotskyi Y., Fomin O., Píšťek 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>.
16. 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.
17. 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>
18. 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.
19. 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>.
20. 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.
21. 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>.
22. 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.
23. 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.
24. 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>.
25. 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.
26. Sagin S.V., Zablotskyi 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.
27. Levynskiy M.V., Levynskiy 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. – Вып. 26. – С.27-40. DOI: 10.31653/1819-3293-2020-1-26-27-40.
28. 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.
29. 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.

30. 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.
31. 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.
32. 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.
33. 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.
34. 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.
35. Sagin S.V., Zablotskyi 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.
36. 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.
37. 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.
38. 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.
39. 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
40. 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.
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. 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.
43. 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>.
44. 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>.
45. 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>.
46. 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.
47. 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.
48. 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>.
49. Sagin A.S., Sagin S.V. Experimental determination of optimal phases of fuel supply to the cylinder of marine diesel engines // *Water transport*. – 2024. – Vol. 1(39). – P. 206-215. doi.org.10.33298/2226-8553.2024.1.39.21.

50. 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.
51. 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.
52. 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.

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

ENSURING HIGH-SPEED OPERATING MODES OF MARINE DIESEL ENGINES USING AN EXHAUST GAS RECIRCULATION SYSTEM

The results of research on ensuring high-speed operating modes of marine diesel engines using an exhaust gas recirculation system are presented. It is noted that low- and high-pressure exhaust gas recirculation systems are methods that contribute to the fulfillment of the requirements of the International MARPOL Convention on atmospheric pollution by nitrogen oxides. It is noted that in low- and high-pressure recirculation systems, the amount of exhaust gases returning to the diesel cylinder can reach 15–20 % of their total volume. This leads to a deterioration in the combustion process and a decrease in peak temperatures in the diesel cylinder. At the same time, on the one hand, the amount of nitrogen oxides formed during fuel combustion is reduced, and on the other hand, the process of gas expansion is slowed down. This causes a decrease in torque and effective power of the diesel engine and leads to the need to increase the cyclic fuel supply. Thus, the reduction in the amount of oxygen entering the diesel cylinder as part of the gas-air mixture causes additional external disturbance to the system of automatic control of its speed. Therefore, the aim of the article was to determine the optimal operating modes of the system of automatic control of the speed of a marine diesel engine during sudden operational loads in the exhaust gas recirculation system. The research was carried out by modeling the corresponding processes of exhaust gas recirculation and crankshaft speed control for a low-speed marine diesel engine 8G60ME from MAN Diesel, equipped with a high-pressure gas recirculation system. The automatic control system included the 8G60ME diesel engine and a controller that provides a proportional-integral control law. The simulation was performed for three different relative loads 1.0; 0.75; 0.5, which corresponded to 20 %, 15 % and 10 % of the exhaust gas recirculation degree. The change in the regulator setting parameters was in the range: gain for the proportional component (0.5–2.5) with a change step of 1.0; integration time (0.2–1.0) s with a change step of 0.4 s. This allowed us to determine the optimal modes, under which the course of transient processes is observed with the shortest regulation time and the smallest speed overshoot.

Keywords: *automatic speed control system, disturbances, exhaust gas recirculation system, exhaust gases, high-speed mode of marine diesel, load, marine diesel, maritime transport, mathematical model, nitrogen oxide emissions, numerical modeling, optimization criteria, regulation, regulator setting parameters, transient process.*

Стаття прийнята 19.03.2025