

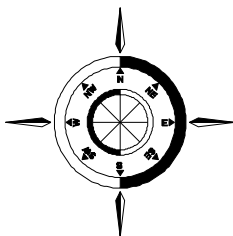
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ОДЕСЬКА МОРСЬКА АКАДЕМІЯ»

АВТОМАТИЗАЦІЯ СУДНОВИХ ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ

Науково-технічний збірник

ВИПУСК 28



Одеса
2023

УДК 681.5:629.12(045)

A22 Автоматизація суднових технічних засобів: науково-технічний збірник. – 2023. – Вип. 28. – Одеса: НУ "ОМА". – 142 с.

Збірник присвячений проблемам розрахунку, проектування і експлуатації суднових автоматизованих технічних засобів. Узагальнено досвід експлуатації і наведені результати досліджень суднових систем автоматичного управління і регулювання.

Для науковців і спеціалістів.

Затверджено до друку вченою радою Національного університету "Одеська морська академія" 30.03.2023, протокол № 7.

Редакційна колегія: д.т.н., проф. С. І. Горб (науковий редактор); к.т.н. С. Г. Хнюнін (відповідальний секретар); д.т.н., доц. В. В. Будашко; д.т.н., проф. Л. Л. Вагущенко; д.т.н., проф. В. А. Голіков; д.т.н., проф. М. В. Міюсов; д.т.н., проф. В. В. Никольський; д.т.н., проф. О. А. Оніщенко; д.т.н., доц. С. В. Сагін; д.т.н., проф. П. С. Суворов; Prof., Dr.–Ing. Reinhard Langmann.

Адреса редакційної колегії: 65052, г. Одеса, вул. Дідріхсона, 8, Національний університет "Одеська морська академія" (НУ "ОМА"), кафедра ТАУ та ОТ. Тел./факс (048) 793-24-75 E-mail: gs@fa.onma.edu.ua

Свідоцтво про державну реєстрацію: серія КВ, № 15286-38588.

Включено до Переліку наукових фахових видань України наказом Міністерства освіти і науки України від 02.07.2020 № 886.

Індексується у науково-метричній базі даних Index Copernicus.

ISSN 1819-3293 (Print)

ISSN 2415-3915 (Online)

© Національний університет "Одеська морська академія"

УДК 621.431.74

ARTICLE HISTORY

Received 10.12.2022

Accepted 26.12.2022

Горб Сергій Іванович¹, Поповський Олексій Юрійович²,
Будуров Микола Ігорович³
НУ "Одеська морська академія", Одеса, Україна
gs@fa.onma.edu.ua¹, alexejpopovskij57@gmail.com²,
budurovuk@gmail.com³

Оптимізація налаштування регулятора частоти обертання дизель-генератора

Gorb Sergii¹, Alexey Popovskii², Budurov Mykola³
National University "Odessa Maritime Academy", Odessa, Ukraine
gs@fa.onma.edu.ua¹, alexejpopovskij57@gmail.com²,
budurovuk@gmail.com³

Optimization of speed governor settings for diesel-generator

Резюме – Обґрунтовано модель для аналізу динаміки системи автоматичного регулювання частоти обертання (САРЧ) дизель-генератора (ДГ) під час ступінчастих змін навантаження. Показано, що через нелінійність ізодромний регулятор частоти обертання (РЧО) по-різному реагує на обурення різної величини. У зв'язку з цим розроблено рекомендації щодо вибору параметрів налаштування ізодромного РЧО у складі дизель-генераторної установки на найбільш імовірних режимах експлуатації.

Abstract – The model for analyzing the dynamics of the automatic speed control system (ASCS) of the diesel generator (DG) during stepped load changes is substantiated. It is shown that due to nonlinearity, the isodromic speed governor (SG) reacts differently to disturbances of different magnitudes. In this regard, recommendations for choosing the setting parameters of the isodromic SG as part of a diesel generator set on the most likely operating modes are developed.

DOI: 10.31653/1819-3293-2023-1-28-03-16

Суднові допоміжні двигуни експлуатуються в умовах ступінчастих змін навантаження внаслідок включення/вимкнення судових

механізмів, що викликає коливання частоти обертання. Оскільки коливання частоти обертання супроводжуються коливаннями параметрів електричного струму, що виробляється, і в разі паралельної роботи двигунів – обмінними коливанням потужності [1], РЧО повинні на експлуатаційних режимах мінімізувати відхилення частоти обертання від заданого значення. Однак традиційно параметри налаштування РЧО вибираються з умови оптимізації динаміки системи автоматичного регулювання при максимально допустимих ступінчастих змінах навантаження, наприклад, під час скидання 100 % навантаження. Частково це пояснюється тим, що стандартами регламентується відхилення і час регулювання частоти обертання при максимально допустимому ступінчастому скиданні навантаження [2]. При цьому не враховується, що ізодромні РЧО є нелінійними об'єктами [3] та їхня реакція на ймовірні в експлуатації збурення може відрізнитися від реакції при максимальному скиданні навантаження. Це означає, що налаштування заводом-виробником РЧО може відрізнитися від оптимального для експлуатаційних режимів роботи ДГ.

У зв'язку з викладеним поставлена задача розробити рекомендації щодо покращення роботи ізодромного РЧО у складі дизель-генераторної установки на найбільш імовірних режимах експлуатації (за умови дотримання вимог до регулювання частоти обертання під час максимально допустимого скидання навантаження).

Як об'єкт дослідження обрано дизель-генераторну установку фірми Yanmar 6N18AL-UV з ізодромним регулятором Yanmar NZ61 великотоннажного нафтового танкера "KORO SEA", який побудований на верфі Namura Ship Building в Японії та введений в експлуатацію 27.02.2008. Основні технічні характеристики ДГ взяті з конструкторської документації [4] та наведені у табл. 1.

Таблиця 1

Технічні характеристики ДГ Yanmar 6N18AL-UV

Кількість циліндрів	6
Діаметр циліндра, мм	180
Хід поршня, мм	280
Номинальна потужність, кВт	500
Номинальна частота обертання, хв ⁻¹	900
Середній індикаторний тиск, кгс/см ²	17,5
Максимальний тиск згоряння, кгс/см ²	180

У досліджуваній САРЧ ізодромний РЧО має дві суттєві нелінійності. Перша пов'язана з тим, що розхід мастила через голку ізодрому змінюється у степеневій залежності від перепаду тисків. А цей перепад під час зміни величини збурюючого сигналу може змінюватися в кілька разів [5], у той час як перепади тисків на вікнах золотника і дросельному отворі порожнини пояска ізодрому змінюються незначно. Зміна перепаду тиску призводить до зміни часу ізодрому. Друга пов'язана з навмисним перекриттям у вікнах золотника, який запобігає реакції регулятора на збурення, викликані циклічною роботою дизеля [6] і скручуванням розподільного валу під час набігання штовхачів паливних насосів на кулачки. Через нелінійності ізодромний РЧО по різному реагує на збурення різної величини.

Принципова схема ізодромного РЧО фірми Yanmar типу NZ61 [7] представлена на рис. 1.

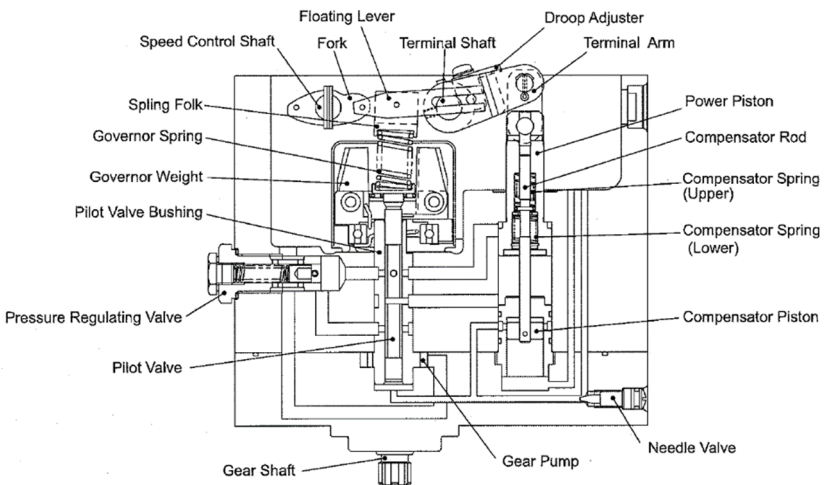


Рис. 1. Принципова схема ізодромного РЧО Yanmar NZ61

Ізодромний зворотний зв'язок (ЗЗ) регулятора вміщує верхню та нижню пружини і поршень ізодрому, які пов'язані з силовим поршнем, а також регульований дросель. Крім цього, корпус поршня ізодрому з'єднаний маслопроводом із нижнім корпусом керуючого золотника, а через регульований дросель масло перепускається в маслозбірник.

Дослідження виконане з використанням моделі САРЧ [8], згідно з якою обертальний момент дизеля у відносних змінних визначається як:

$$\overline{M}_d = \frac{1}{\eta_{m0}} [\overline{M}_i - (1 - \eta_{m0})(0,19 + 0,14\overline{M}_i + 0,67\overline{\omega}_d)], \quad (1)$$

де η_{m0} – механічний ККД дизеля на номінальному режимі; \overline{M}_i – відносний індикаторний момент дизеля; $\overline{\omega}_d$ – відносна кутова швидкість валу.

Індикаторний момент дизеля вважається пропорційним до зміни подачі палива ($\overline{M}_i = \overline{h}_p$). Однак у зв'язку з циклічністю роботи дизеля операція присвоєння значення \overline{h}_p змінній \overline{M}_i виконується через проміжки часу $\Delta\tau$ (с), що відповідають повороту кривошипа на кут між послідовними впорскуваннями в циліндри дизеля:

$$\Delta\tau = \frac{\varphi_{\Pi}}{in_{d0} \overline{\omega}_{d0} \cdot 60}, \quad (2)$$

де φ_{Π} – кут повороту кривошипа за цикл, град; i – кількість циліндрів дизеля; n_{d0} – частота обертання валу на номінальному режимі, хв^{-1} .

У дизелях характерно запізнення зміни \overline{M}_i за відношенням до зміни подачі палива \overline{h}_p :

$$\tau_{\text{зап}} = \frac{20 - 10\overline{h}_p}{6n_{d0} \overline{\omega}_d}. \quad (3)$$

Урахування циклічності роботи дизеля за виразом (2) і запізнення за виразом (3) найбільш доцільно при малих частотах обертання дизелів. У досліджуваному середньоберттовому дизелі з частотою обертання 900 хв^{-1} величини $\Delta\tau$ і $\tau_{\text{зап}}$ відносно малі: порядку 0,002 с кожна. Це означає, що цими нелінійностями можна знехтувати.

Нечутливість регулятора, пов'язана з перекриттям вікон золотника, має алгоритм перетворення сигналу:

$$\overline{z}_m = \begin{cases} \overline{z}_3 - \frac{\varepsilon}{2} & \text{при } \overline{z}_3 > \frac{\varepsilon}{2}; \\ \overline{z}_3 + \frac{\varepsilon}{2} & \text{при } \overline{z}_3 < -\frac{\varepsilon}{2}; \\ 0 & \text{при } |\overline{z}_3| \leq \frac{\varepsilon}{2}, \end{cases}$$

де ε – відносна зона нечутливості золотника.

Відносна зміна подачі палива пов'язана з вихідним сигналом регулятора співвідношенням:

$$\bar{h}_p' = \frac{\bar{z}_c}{k_{в.х}},$$

де $k_{в.х}$ – відносна величина використання ходу регулятора під час переходу від нульової подачі палива до номінальної.

Розрахунковий вираз ізодромного ЗЗ має вигляд:

$$\frac{d\bar{\xi}_1}{dt} = k_i \frac{d\bar{z}_c}{dt} - \text{sign}(\bar{\xi}_1) \frac{\sqrt{|\bar{\xi}_1|}}{T_i^*}, \quad (4)$$

де $\bar{\xi}_1$ – відносний вихідний сигнал ізодромного ЗЗ; \bar{z}_c – відносний сигнал ходу силового сервомотора; k_i – коефіцієнт передачі ізодромного ЗЗ; T_i^* – час ізодромного ЗЗ.

Структурна схема САРЧ суднового ДГ Yanmar 6N18AL-UV з РЧО Yanmar NZ61 приведена на рис. 2.

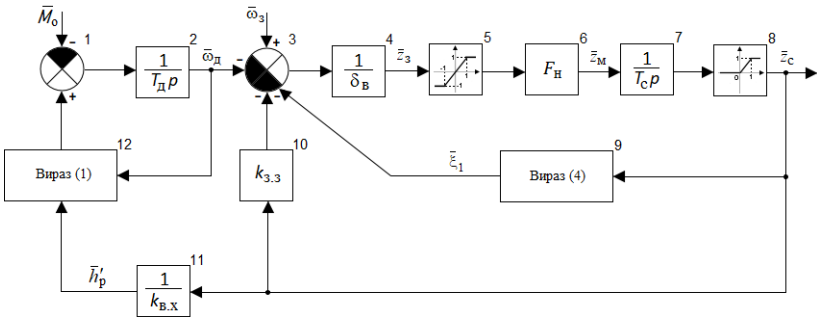


Рис. 2. Структурна схема САРЧ суднового ДГ Yanmar 6N18AL-UV

Структурна схема містить: 1, 3 – суматори; 2, 7 – інтегруючі ланки; 4, 10 – пропорційні ланки; 5 і 8 – нелінійні ланки, які враховують насичення сигналу на рівні ± 1 в діапазоні $0 \dots 1$ відповідно; 6 – функціональний перетворювач, який вводить зону нечутливості, пов'язану з перекриттям вікон золотника; 9 – нелінійний ізодромний ЗЗ; 11 – ланка, яка враховує співвідношення ходу рейки

паливних насосів і силового поршня регулятора; 12 – ланка, яка враховує обертальний момент дизеля.

Модель САРЧ суднового дизеля Yanmar 6N18AL-UV з ізодромним регулятором Yanmar NZ61 приведена на рис. 3.

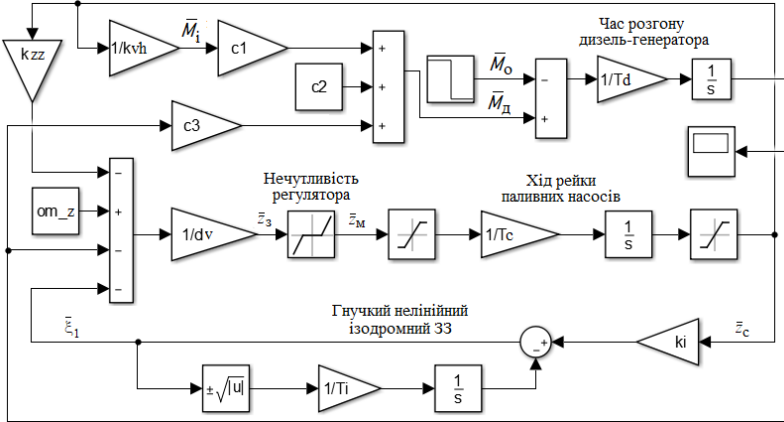


Рис. 3. Модель САРЧ суднового ДГ Yanmar 6N18AL-UV з ізодромним регулятором Yanmar NZ61

У моделі використовувалися наступні значення: початковий M_{o1} і кінцевий M_{o2} відносні моменти навантаження 0...1 відн. од.; відносна частота обертання на початковому режимі $\bar{\omega}_d = 1 + (1 - M_{o1})k$, де $k = 0,044$ відн. од. – кутовий коефіцієнт навантажувальної характеристики; час розгону ДГ $T_d = 1,8$ с; відносна величина зони нечутливості регулятора $\varepsilon = 0,002$ відн. од.; нерівномірність вимірювача частоти обертання $\delta_B = 0,08$ відн. од.; коефіцієнт передачі ізодромного ЗЗ $k_i = 0,05 \dots 0,5$ с⁻¹; час ізодромного ЗЗ $T_i^* = 0,1 \dots 3$ с; час силового сервомотора РЧО $T_c = 0,36$ с; коефіцієнт використання ходу регулятора під час переходу від нульової до номінальної подачі палива $k_{в.х} = 0,75$ відн. од.; коефіцієнт передачі жорсткого ЗЗ $k_{3,3} = 0,067$ відн. од.; механічний

ККД ДГ $\eta_{M0} = 0,87$ відн. од.; кут повороту кривошипа за цикл $\varphi_{ц} = 4\pi$; число циліндрів двигуна $i = 6$; частота обертання валу на номінальному режимі $n_{д0} = 900$ хв⁻¹; $c_1 = (1 - 0,14(1 - \eta_{M0})) / \eta_{M0}$; $c_2 = -0,19(1 - \eta_{M0}) / \eta_{M0}$; $c_3 = -0,67(1 - \eta_{M0}) / \eta_{M0}$; початкове положення штока керуючого силового гідроциліндра $z_c = (1 - c_3 \bar{\omega}_d - c_2) k_{в.х} / c_1$; відносний сигнал завдання $\bar{\omega}_3 = \bar{\omega}_d + k_{3,3} z_c$.

У дослідженні під "оптимальним" налаштуванням РЧО розумілося таке, що забезпечує мінімум закидання регульованої величини з дотриманням дозволеного стандартами часу регулювання частоти обертання. Моделюванням встановлено, що для різних величин скидання навантаження оптимальні налаштування ізодромного ЗЗ РЧО істотно різняться (табл. 2).

Таблиця 2

Оптимальні налаштування ізодромного ЗЗ під час скидання навантаження в діапазоні 10 ... 90 %

$\Delta M_c, \%$	k_i, c^{-1}	T_i, c
10	0,044	0,288
20	0,046	0,292
30	0,056	0,312
40	0,074	0,348
50	0,100	0,400
60	0,134	0,468
70	0,176	0,552
80	0,226	0,652
90	0,284	0,768

На рис. 4 наведено перехідні процеси в САРЧ під час скидання навантаження в діапазоні 10 ... 90 % із кроком 10 % та оптимальних налаштуваннях ізодромного ЗЗ із табл. 2.

Для порівняння на рис. 5 – 7 наведено перехідні процеси в САРЧ під час скидання навантаження в діапазоні 10 ... 90 % із кроком 10 %:

рис. 5 – під час скидання навантаження зберігаються налаштування ізодромного ЗЗ, оптимальні для режиму 10 % скидання;

рис. 6 – під час скидання навантаження зберігаються налаштування ізодромного ЗЗ, оптимальні для режиму 50 % скидання;

рис. 7 – під час скидання навантаження зберігаються налаштування ізодромного ЗЗ, оптимальні для режиму 90 % скидання.

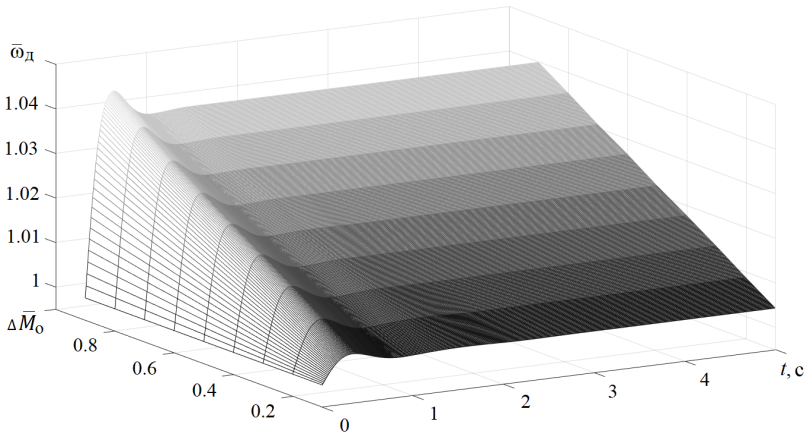


Рис. 4. Перехідні процеси в САРЧ під час скидання навантаження в діапазоні 10 ... 90 % з оптимальним налаштуванням ізодромного ЗЗ для кожного режиму

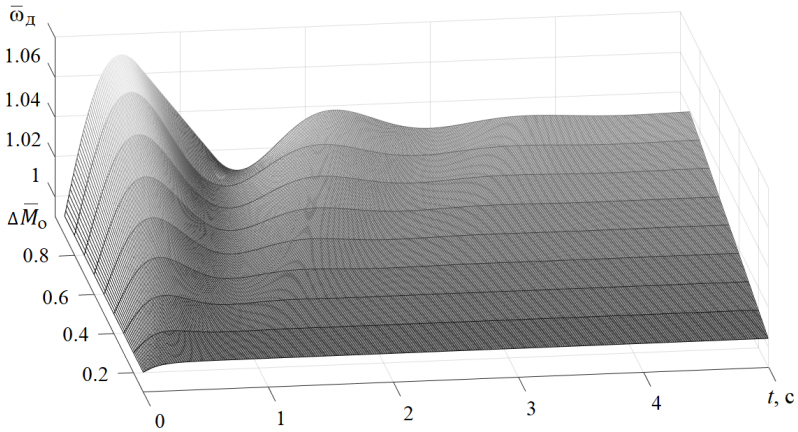


Рис. 5. Перехідні процеси в САРЧ при скиданні навантаження в діапазоні 10 ... 90 % із налаштуванням ізодромного ЗЗ ($k_i = 0,044 \text{ c}^{-1}$; $T_i = 0,29 \text{ c}$)

Рис. 5 – 7 підтверджують, що для різних величин скидання навантаження оптимальність забезпечується при різному налаштуванні ізодромного ЗЗ. Однак в експлуатації відсутня можливість переналаштовування ізодромного ЗЗ залежно від експлуатаційного режиму роботи судна. Тому пропонується використовувати субоптимальне налаштування ізодромного ЗЗ РЧО, яке визначається для найбільш імовірних в експлуатації істотних величин скидання/накидання навантажень.

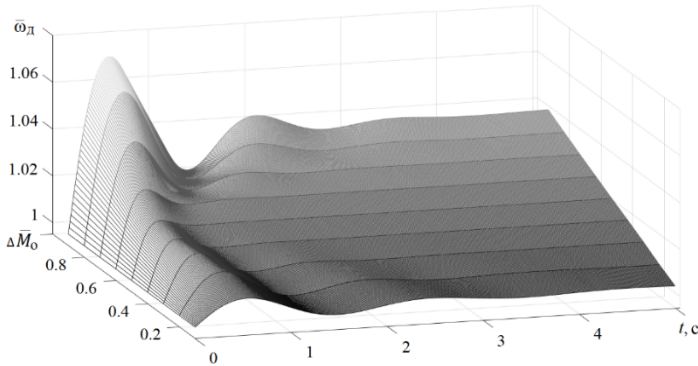


Рис. 6. Перехідні процеси в САРЧ при скиданні навантаження в діапазоні 10 ... 90 % із налаштуванням ізодромного ЗЗ ($k_i = 0,1 \text{ c}^{-1}$; $T_i = 0,4 \text{ c}$)

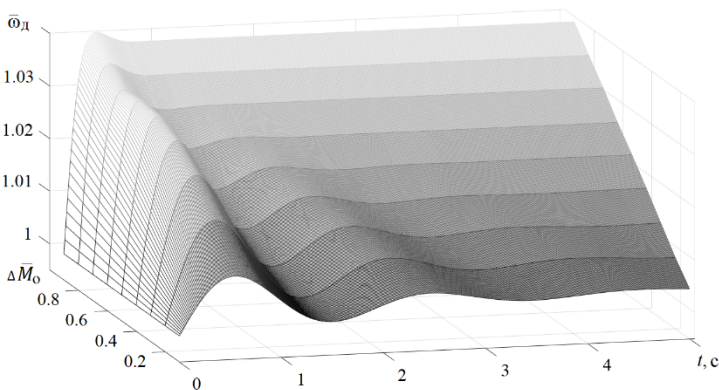


Рис. 7. Перехідні процеси в САРЧ під час скидання навантаження в діапазоні 10 ... 90 % із налаштуванням ізодромного ЗЗ ($k_i = 0,284 \text{ c}^{-1}$; $T_i = 0,768 \text{ c}$)

Аналіз потужностей споживачів танкера "KORO SEA", а також їхнє відношення до потужності дизель-генераторів (з урахуванням їхньої кількості в роботі на різних експлуатаційних режимах та ймовірності включення) показав, що в експлуатації САРЧ має забезпечити необхідну динаміку в широкому діапазоні скидання/накидання навантаження. Найбільші величини скидання/накидання навантаження (при включенні/вимкненні споживачів потужністю понад 30 кВт) склали:

- нормальний ходовий режим судна – 25 ... 50 %;
- очищення вантажних танків на ходу судна – 20 ... 55 %;
- обігрів вантажу на ходу судна – 10 ... 30 %;
- під час заходу/виходу судна в/із порт(у) – 25 ... 60 %;
- під час вантажних операціях – 25 ... 75 %;
- у порту – 20 ... 40 %.

Найбільш імовірною в експлуатації істотною величиною скидання/накидання навантаження для досліджуваного судна визнано 20 – 25 %. Для такого скидання/накидання навантаження субоптимальне налаштування ізодромного ЗЗ склало: $k_i = 0,05 \text{ c}^{-1}$; $T_i = 0,3 \text{ с}$. На рис. 8 показані перехідні процеси в САРЧ суднового ДГ Yanmar 6N18AL-UV із регулятором Yanmar NZ61 під час скидання навантаження в діапазоні 10 ... 90 % із субоптимальним налаштуванням ізодромного ЗЗ. Це налаштування практично зберігає закидання частоти обертання, показане на рис. 4 під час скидання 10 % навантаження. Якщо порівнювати субоптимальне налаштування ізодромного ЗЗ із оптимальним для скидання 90 % навантаження (останнє найбільш імовірне, як рекомендоване конструкторською документацією), то воно забезпечує на найбільш імовірних режимах експлуатації ДГ зменшення закидання частоти обертання на 0,02 відн. од.

Таким чином показано, що навіть правильне налаштування заводом-виробником ізодромних РЧО суднових ДГ через нелінійності РЧО може не забезпечити їхню оптимальну роботу на найбільш імовірних експлуатаційних режимах. Із метою покращення динамічних характеристик РЧО в експлуатації запропоновано методологію вибору параметрів налаштування ізодромного ЗЗ, яка апробована на судновій дизель-генераторній установці Yanmar 6N18AL-UV з ізодромним регулятором Yanmar NZ61.

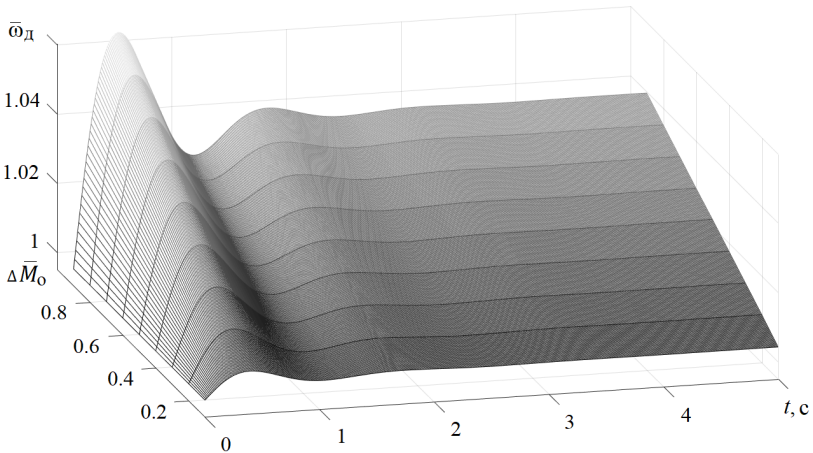


Рис. 8. Перехідні процеси в САРЧ при скиданнях навантаження в діапазоні 10 ... 90 % із субоптимальним налаштуванням ізодромного ЗЗ ($k_i = 0,05 \text{ c}^{-1}$; $T_i = 0,3 \text{ c}$)

Подальше дослідження планується у напрямку оцінки доцільності автоматизації зміни параметрів налаштування РЧО залежно від фактичних скидань / накидань навантаження на дизель в експлуатації.

ЛИТЕРАТУРА REFERENCES

1. Горб С.И. Моделирование судовых дизельных установок и систем управления: учебное пособие. – М.: Транспорт, 1993. – 134 с.
2. Rules for classification: Ships – DNV (July, 2022). Retrieved from <https://standards.dnv.com/>
3. Planakis N, Karystinos V, Papalambrou G, Kyrtatos N. Transient Energy Management Controller for Hybrid Diesel-Electric Marine Propulsion Plants using Nonlinear MPC. // *IFAC-PapersOnLine*, 53 (2), 2020. – P. 14710 – 14715.
4. Shop Test Result for Main Diesel Generator Engine 6N18AL-UV, I.B.C. No. B6-0046501. – 2007. – 38 p.
5. Горб С.И. Оптимизация параметров гидромеханического регулятора частоты вращения. // *Двигателестроение*. – 1988. – №12. – С. 39 – 41.

6. Горб С.И., Бурденко А.Ф. Усовершенствованный метод оптимизации гидромеханических регуляторов частоты вращения главных двигателей. //Автоматизация судовых технических средств: науч.-техн. сб. – 2000. – Вып. 5. – Одесса: ОГМА. – С. 28 – 32.

7. Service Manual for NZ61 / NZ115 Series Hydraulic Governor, I.B.C. No. 0BNZ6-G00100. – 2008. – 47 p.

8. Горб С.И. Анализ систем автоматического регулирования частоты вращения судовых дизельных установок: учебное пособие. – М.: В/О "Мортехинформреклама", 1989. – 44 с.

Анотація – Традиційно параметри налаштування РЧО вибираються з умови оптимізації динаміки системи автоматичного регулювання при максимально допустимій ступінчастій зміні навантаження. У свою чергу, ізодромні РЧО є нелінійними об'єктами та їхні реакції на ймовірні в експлуатації збурення можуть відрізнятися від реакції під час максимального скидання навантаження. Це означає, що налаштування РЧО заводом-виробником може відрізнятися від оптимального для експлуатаційних режимів роботи. У зв'язку з цим поставлено завдання розробити рекомендації щодо покращення роботи ізодромного РЧО у складі дизель-генераторної установки на найбільш ймовірних режимах експлуатації (за умови дотримання вимог до регулювання частоти обертання під час максимально допустимого скидання навантаження).

Перехідні процеси в САРЧ під час скидання навантаження в діапазоні 10 ... 90 % підтверджують, що для різних величин скидання навантаження оптимальність забезпечується при різному налаштуванні ізодромного ЗЗ. Однак в експлуатації відсутня можливість переналаштування ізодромного ЗЗ залежно від експлуатаційного режиму роботи судна. Тому пропонується використовувати субоптимальне налаштування ізодромного ЗЗ РЧО, яке визначається для найбільш ймовірних в експлуатації істотних величин скидання/накидання навантажень. Аналіз потужностей споживачів танкера "KORO SEA", а також їхнє відношення до потужності дизель-генераторів (з урахуванням їхньої кількості в роботі на різних експлуатаційних режимах та ймовірності включення) показав, що найбільш ймовірною в експлуатації істотною величиною скидання/накидання навантаження є 20 – 25 %. Для такого скидання/накидання навантаження субоптимальне налаштування ізодромного ЗЗ склало: $k_i = 0,05 \text{ с}^{-1}$; $T_i = 0,3 \text{ с}$. Отримані перехідні

процеси в САРЧ у діапазоні 10 ... 90 % із субоптимальним налаштуванням ізодромного ЗЗ показали, що це налаштування забезпечує на найбільш імовірних режимах експлуатації ДГ зменшення закидання частоти обертання на 0,02 відн. од. у порівнянні з оптимальним для скидання 90 % навантаження. А також практично зберігає закидання частоти обертання при оптимальному налаштуванні для скидання 10 % навантаження. Таким чином показано, що навіть правильне налаштування заводом-виробником ізодромних РЧО судових ДГ через нелінійності РЧО може не забезпечити їхню оптимальну роботу на найбільш імовірних експлуатаційних режимах. Із метою покращення динамічних характеристик РЧО в експлуатації запропоновано методологію вибору параметрів налаштування ізодромного ЗЗ, яка апробована на судовій дизель-генераторній установці Yanmar 6N18AL-UV з ізодромним регулятором Yanmar NZ61.

Annotation – Traditionally, the SG tuning parameters are selected from the condition of optimizing the dynamics of the automatic control system with the maximum allowable load step change. In turn, isodromic SGs are non-linear objects and their response to possible disturbances in operation may differ from the response at maximum load shedding. This means that the SG factory setting may not be optimal for operating conditions. In this regard, the task was set to develop recommendations for improving the operation of the isodromic SG as part of a diesel generator set in the most likely operating modes (provided compliance with the requirements for speed regulation during the maximum permissible load shedding).

Transient processes in the ASCS during load shedding in the range of 10 ... 90 % confirm that for different values of load shedding, optimality is ensured with different settings of the isodromic feedback. However, in operation, there is no possibility of reconfiguring the isodromic feedback depending on the operating mode. Therefore, it is suggested to use the suboptimal setting of the isodromic feedback, which is determined for the most likely in operation significant values of load shedding/ surge. An analysis of the capacities of the consumers of the tanker "KORO SEA", as well as their relationship to the diesel generators power (taking into account their number in operation at different operating modes and the probability of inclusion) showed that the most probable in operation and significant value of load shedding/load surge is 20 – 25 %. For such load shedding / surge, the suboptimal setting of the isodromic feedback: $k_i = 0,05 \text{ s}^{-1}$; $T_i = 0,3 \text{ s}$. The obtained transient processes in the ASCS in the range of 10 ... 90 % with a suboptimal setting of the isodromic feedback showed that

this setting provides, in the most likely modes of DG operation, a reduction in the rotation frequency by 0,02 rel. un. compared to the optimal setting for 90 % load shedding. As well as practically preserves the rotational frequency overshoot at the optimal setting for 10 % load shedding. Thus, it is shown that even the correct setting by the manufacturer of the isodromic SG of marine DG due to the nonlinearities of the SG may not ensure their optimal operation in the most probable operating modes. In order to improve the dynamic characteristics of the SG in operation, a methodology for selecting the parameters of setting the isodromic feedback is proposed, which was tested on the Yanmar 6N18AL-UV marine diesel generator set with the Yanmar NZ61 isodromic regulator.

УДК 629.12

ARTICLE HISTORY

Received 30.01.2023

Accepted 10.02.2023

Зайцев В.В.¹, Зайцев Вал.В.², Зайцев Д.В.³

Национальный университет кораблестроения им. адм. Макарова,

Николаев, Украина

zv1949@gmail.com¹, zvalv1974@gmail.com²,zdmv11982@gmail.com³

Прогнозирование расходов воздуха в подъемном комплексе амфибийных судов на воздушной подушке в штатных режимах их эксплуатации

V. Zaytsev¹, Val. Zaytsev², D. Zaytsev³

National University of Shipbuilding named after Adm. Makarov,

Nikolaev, Ukraine

zv1949@gmail.com¹, zvalv1974@gmail.com²,zdmv11982@gmail.com³

Forecasting air consumption in the lifting complex of hovercraft in their normal operating modes

Резюме – Предложена методика прогнозирования расходов воздуха в подъемном комплексе (ПК) амфибийных судов на воздушной подушке (СВПА) с помощью имитационного моделирования его работы в штатных режимах их эксплуатации и исследования мореходных качеств. Рассмотрено прогнозирование работы подъемного комплекса автомобильно-пассажирского паромы (АПП) на воздушной подушке амфибийного типа "Марал". Система дифференциальных уравнений неразрывности расходов воздуха в ПК АПП "Марал" определяет его состояние в каждый момент времени. Приводится функция для вычисления плотности воздуха от его избыточного давления, а также функция вычисления избыточного давления воздуха от его плотности. Представленная математическая модель, воплощенная в программу, позволяет углубленно анализировать динамику и мореходные качества СВПА до завершения их проектирования и до начала постройки. Разработан алгоритм прогнозирования расходов воздуха в ПК

СВПА в штатных режимах их эксплуатации и исследования мореходных качеств.

Abstract – A method for predicting air flow in the lifting complex (LC) of hovercraft using simulation modeling of its operation in normal modes of their operation and the study of seaworthiness is proposed. The forecasting of the operation of the lifting complex of an amphibious Car-Passenger Ferry (CPF) on an air cushion of the "Maral" type is considered. The system of differential equations for the continuity of air flow rates in the "Maral" determine its state at each moment of time. A function for calculating the air density from its excess pressure, as well as a function for calculating the excess air pressure from its density, is given. The presented mathematical model, embodied in the program, allows in-depth analysis of the dynamics and seaworthiness of hovercrafts before the completion of their design and before the start of construction. An algorithm has been developed for predicting air flow in the hovercraft lifting complex in normal modes of their operation and studying seaworthiness.

DOI: 10.31653/1819-3293-2023-1-28-17-29

Под подъемным комплексом СВПА понимают совокупность систем, устройств и механизмов, призванных постоянно поддерживать под днищем судна область избыточного статического давления воздуха, который, воздействуя на поверхность днища судна снизу вверх, создает подъемную силу, удерживающую СВПА на высоте, определенной техническим заданием (ТЗ) и условиями эксплуатации.

Воздух избыточного давления, заключенный в области под днищем судна, вытекает через щель под периферийным гибким ограждением (ГО) по всему периметру судна и в таком же количестве подается в нее одним или несколькими воздухонагнетателями, являющимися лопаточными машинами, вращение которых осуществляется от приводных двигателей, входящих в состав энергетической установки (ЭУ). В таком понимании подъемный комплекс является компонентом ЭУ.

Воздух, подаваемый в область ВП, забирается нагнетателями из атмосферы через специальные воздухоприемные отверстия в корпусе судна или через специальные каналы в виде шахт, откуда он через конфузор поступает непосредственно к лопаточному устройству нагнетателя. За нагнетателем для воздуха устраивается сложная транспортно-распределительная система, состоящая из диффузоров, преобразующих динамическую составляющую полного давления воздуха, развиваемого нагнетателем, в статическую; внутренних

воздухоуловов, распределяющих воздух по судну и именуемых ресиверами.

Ресиверами при этом являются и надувные конструкции ГО, располагающихся по периферии судна, которые выполняют функции как раздачи воздуха (по пути его движения через специальные сопла и щели или отверстия), так и удержания под днищем судна области ВП, что обеспечивается свойствами ГО, функционирующих в качестве податливой завесы, отклоняющейся при прохождении препятствий на поверхности экрана.

Кроме перечисленных компонентов ПК в него входит устанавливаемая, как правило, только на крупных СВПА система управления и регулирования ПК, в которую включаются стравливающие воздух из ВП клапаны, дроссельные заслонки в воздуховодах, система автоматизированного управления работой непосредственно нагнетателя.

Рассматривая описанный состав ПК, при его проектировании можно выделить следующие задачи.

1. Проектирование ГО области воздушной подушки (ВП).
2. Обоснование расходно-напорных характеристик ПК, обеспечивающих поддержание под судном области ВП.
3. Выбор нагнетателя и приводного двигателя.
4. Расчетно-графическая разработка компоновки подъемного комплекса.

Последовательность, в которой перечислены задачи, в значительной мере условна. Их анализ показывает, что ПК представляет собой сложную динамическую систему, проектирование которой возможно только методом последовательных приближений. Так, например, для решения третьей задачи нужны исходные данные, большинство которых можно получить только после решения остальных задач.

Существуют различные методики и теории проектирования отдельных элементов ПК, в основном различных типов гибких ограждений ПК [1 – 7]. Однако проектирование ГО не может проводиться без учета взаимного влияния всех элементов системы, участвующих в обеспечении подъема и движения СВПА над водной поверхностью. Основные элементы этой системы – корпус судна, движители, ПК, который включает носовое гибкое ограждение (НГО), кормовое гибкое ограждение (КГО), бортовые гибкие ограждения (БГО), внутреннее ГО (продольный и поперечные кили), нагнетатели ВП, обеспечивающие подачу воздуха в ВП и ресиверы ГО, воздухопроводные каналы. В зависимости от величины избыточного

давления воздуха в ВП, зазоров между ГО и водной поверхностью изменяется расход воздуха и соответственно мощность и производительность нагнетателей, изменяются избыточные давления в ресиверах КГО, НГО, БГО, и внутреннего ГО, изменяется их форма и напряженно-деформированное состояние (НДС). Изменение формы ГО приводит к изменению посадки СВПА и соответственно изменяется скорость его движения. На начальных этапах проектирования ГО и нагнетателей сети обычно можно не учитывать влияние параметров воздухопроводных вырезов в оболочках ресиверов СВПА, влияние параметров формы НГО и КГО на параметры нагнетательной установки. На окончательных этапах проектирования все эти факторы необходимо увязать между собой и решить сложнейшую проектную задачу. В работе [8] представлена методика создания симуляций амфибийных судов на воздушной подушке (СВПА) для различных режимов их эксплуатации и исследования мореходных качеств. Рассмотрены различные типы симуляций таких судов и пути их воплощения в функционирующее программное обеспечение. Особое внимание уделено описанию созданию интерактивной симуляции в режиме реального времени. Описаны основные математические модели, которые участвуют в реализации таких симуляций, показана их структура для различных амфибийных судов на воздушной подушке. Представленный комплекс математических моделей, воплощенный в программу, позволяет углубленно анализировать динамику и мореходные качества СВПА до завершения их проектирования и до начала постройки. Данная статья является продолжением работ по прогнозированию работы СВПА.

Цель данной статьи – решение второй задачи и создание методики прогнозирования расходов воздуха в ПК СВПА с помощью имитационного моделирования его работы в штатных режимах их эксплуатации и исследования мореходных качеств.

Решение указанной задачи рассмотрим на примере ПК АПП "Марал" (рис. 1) и базируется на исследовании конструкции его ГО (рис. 2) а также математическая модель системы ПК (рис. 3), состоящей из корпуса СВПА, нагнетательной установки (по два нагнетателя осевых (НО), расположенной симметрично ДП на левом и правом бортах судна; воздухопроводных каналов правого и левого бортов, идущих в НГО, КГО, БГО, продольный и поперечный кили внутреннего ГО).

Гидро- и аэродинамика – наука, которая занимается изучением законов движущихся жидкостей и газов. Законы движения жидкостей справедливы и для газов, если скорости потока оказываются меньше

скорости звука, поскольку в этом случае так можно считать практически.

Для определения в каждый момент времени давлений воздуха во всех составляющих элементах ПК АПП "Марал" необходимо использовать уравнения неразрывности потока воздуха, проходящего по его ПК.

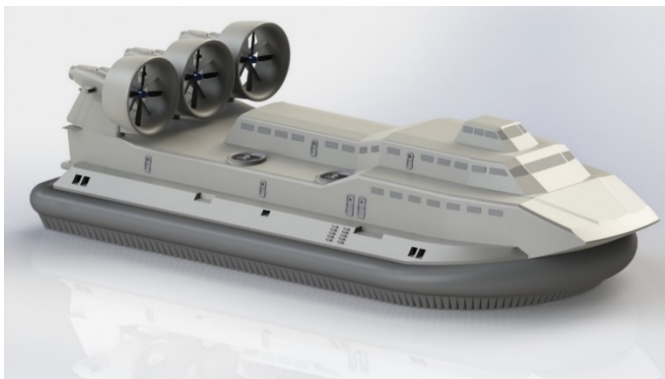


Рис. 1. Общий вид автомобильно-пассажирского паром "Марал"

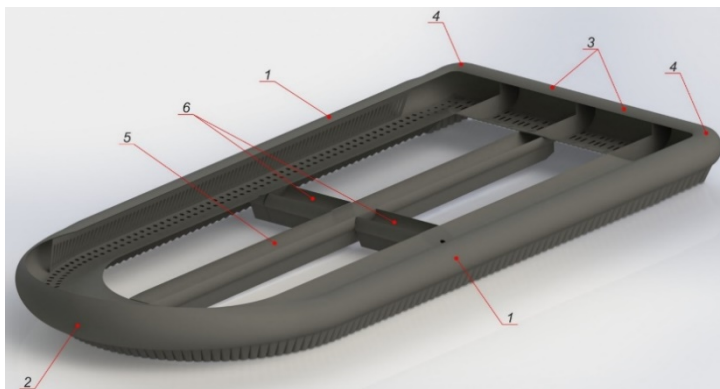


Рис. 2. Конструкция гибкого ограждения АПП "Марал":
1 – секции бортового ГО; 2 - носовое ГО; 3 – кормовое ГО; 4 –
угловые секции ГО; 5 – продольный киль внутреннего ГО; 6 –
поперечные кили правого и левого бортов внутреннего ГО

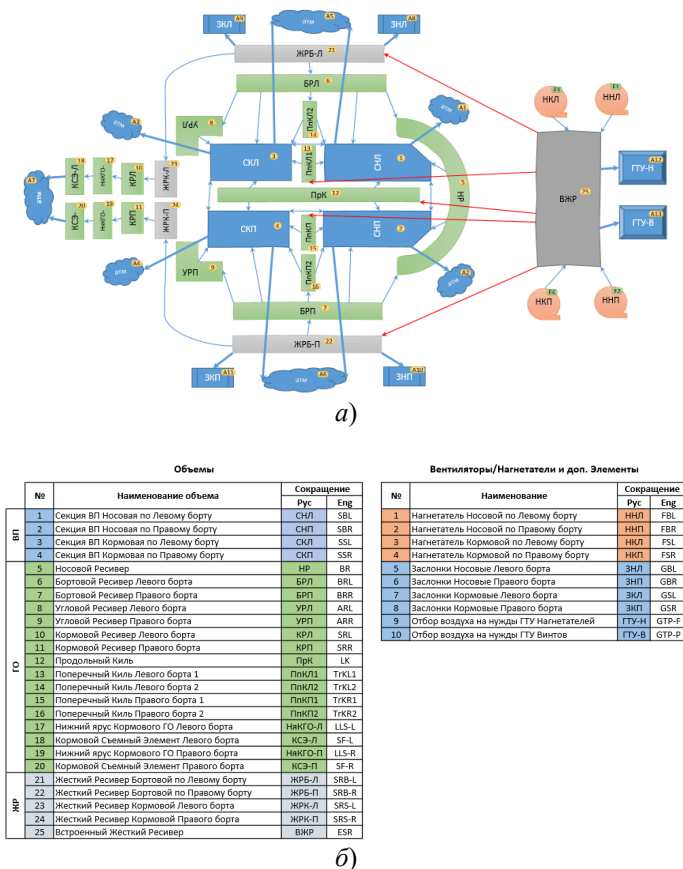


Рис. 3. Схематическое изображение ПК АПП "Марал":
 а) – схема связей; б) – названия элементов ПК СВПА

Состояние ПК АПП "Марал" в каждый момент времени t может быть описано системой дифференциальных уравнений неразрывности воздуха:

$$\{Eq_i\} \quad i \in 1 \dots n, \quad (1)$$

где n – количество емкостей в пневматической системе, описывающей ПК АПП "Марал"; $E q_i$ – i -е уравнение системы.

Дифференциальное уравнение неразрывности для i -ой емкости системы (рис. 4) записывается в виде:

$$E q_i \leftarrow \sum_{j=1}^n m_{ji} - \sum_{j=1}^n m_{ij} = W_i \frac{d\rho_i}{dt} + \rho_i \frac{dW_i}{dt}, \quad (2)$$

где m_{ji} – входящие в i -ю емкость массовые расходы воздуха, кг/с; m_{ij} – исходящие из i -ой емкости массовые расходы воздуха, кг/с; W_i – объем i -ой емкости системы, м³; ρ_i – плотность воздуха в i -ой емкости системы, кг/м³.

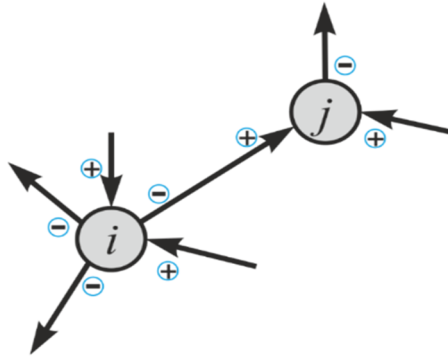


Рис. 4. Схематическое изображение пары объемов системы ПК АПП "Марал"

На рис. 3 знаками "-" и "+" обозначены знаки расходов воздуха, то есть исходящий из емкости воздух вычисляется со знаком "минус", а входящий – со знаком "плюс".

Массовый расход воздуха m_{ij} в направлении $i \rightarrow j$ определяется зависимостью:

$$m_{ij} = \rho_i Q_{ij}, \quad (3)$$

где Q_{ij} – объемный расход воздуха, м³/с,

$$Q_{ij} = S_{ij} \mu_{ij} \sqrt{\frac{2 \cdot (P_i - P_j)}{\rho_i}}, \quad (4)$$

S_{ij} – площадь отверстия, соединяющего емкости i и j , м²; $\mu_{ij} = 0,6 + 1,45 \cdot 10^{-6} (P_i - P_j)$ – коэффициент поджатия струи воздуха; P_i, P_j –

избыточные (превышающие атмосферное) давления воздуха в емкостях i и j , Па.

В процессе численного решения системы уравнений (1 – 4) неразрывности воздуха возникает необходимость по известному избыточному давлению воздуха P вычислять его плотность ρ и наоборот.

Исходными данными и основными параметрами для прогнозирования расходов воздуха в ПК АПП "Марал" являются следующие величины и матрицы:

n – количество емкостей в пневматической системе;

n_f – количество нагнетателей;

n_o – количество связей;

матрица объемов

$$[W] = \begin{bmatrix} W_1 \\ W_2 \\ \dots \\ W_n \end{bmatrix};$$

матрица давлений в объемах

$$[P] = \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ \dots \\ P_n \end{bmatrix};$$

матрица напоров в нагнетателях

$$[PV] = \begin{bmatrix} in_1 & out_1 & PV_1 \\ in_2 & out_2 & PV_2 \\ \dots & \dots & \dots \\ in_{n_f} & out_{n_f} & PV_{n_f} \end{bmatrix};$$

матрица связей (отверстий)

$$[SV] = \begin{bmatrix} \alpha_1 & \beta_1 & s_1 \\ \alpha_2 & \beta_2 & s_2 \\ \dots & \dots & \dots \\ \alpha_{n_o} & \beta_{n_o} & s_{n_o} \end{bmatrix},$$

где in_i , out_i – номера емкостей, между которыми расположен нагнетатель; PV_i – напор i -го нагнетателя; α_i , β_i – номера емкостей, между которыми расположено отверстие, s_i .

Функция для вычисления плотности воздуха $\rho_{air}(P)$, кг/м³, от его избыточного давления P , Па, а также функция вычисления

избыточного давления воздуха от его плотности определяются следующими выражениями:

$$\rho_{air}(P) = \left(1 + \frac{P}{P_{atm}} \frac{1}{K} \right) \cdot \rho_{atm}, \quad (5)$$

где $P_{atm} = 101325$ – атмосферное давление воздуха, Па; $K = 1,4$ – коэффициент;

$$P_{air}(\rho) = \frac{K \cdot P_{atm} \cdot (\rho - \rho_{atm})}{\rho_{atm}}, \quad (6)$$

где $\rho_{atm} = 1,225$ – плотность воздуха при атмосферном давлении, кг/м³.

Расчет выполняется в соответствии с алгоритмом:

подготовка исходных данных;

выполнение вычислений, относящихся к начальному моменту времени, t_0 ;

выполнение вычислений (имитационного моделирования) в заданном промежутке времени – $[t_0; t_k]$.

Для начального момента времени, t_0 , в матрице $[PV]$ задаются напоры нагнетателей и с помощью зависимости (5) вычисляются соответствующие плотности воздуха $[\rho_v]$. Далее в матрице $[P]$ задаются начальные избыточные давления для всех объемов подъемного комплекса и вычисляются соответствующие плотности воздуха $[\rho]$.

Затем заполняется матрица объемов $[W]$. В дальнейшем в ходе имитации часть элементов этой матрицы будет меняться, так как будет меняться форма и соответственно объем гибких ограждений (ГО) и секций ВП.

Также необходимо заполнить значения матрицы связей $[SV]$ для начального момента времени. В ходе имитации значения элементов этой матрицы в основном будут неизменными, но есть исключения – площади воздушных зазоров между нижними кромками ГО и водной поверхностью.

Далее необходимо вычислить начальные расходы воздуха: объемные – Q_{ij} ; массовые – m_{ij} .

Последним шагом, относящимся к вычислениям в начальный момент времени, является определение для каждой i -ой емкости производной dp_i/dt после преобразования к виду:

$$\frac{dp_i}{dt} = \frac{\sum_{j=1}^n m_{ji} - \sum_{j=1}^n m_{ij}}{W_i}. \quad (7)$$

Для начального момента времени для всех емкостей принято, что $dW_i/dt = 0$. На этапе имитационного моделирования вначале принимается шаг интегрирования Δt . Затем, в принятом промежутке времени $[t_0; t_k]$, последовательно выполняются шаги имитационного моделирования.

Алгоритм выполнения каждого шага, следующий:

вычисление новых значений плотности воздуха в каждой емкости

$$[\rho] = [\rho] + \Delta t \cdot \left[\frac{d\rho}{dt} \right];$$

вычисление новых значений давлений воздуха в каждой емкости

$$[P] = P_{air}([\rho]);$$

вычисление в соответствии с (4) новых значений объемных расходов воздуха Q_{ij} ;

вычисление в соответствии с (3) новых значений массовых расходов воздуха m_{ij} ;

вычисление новых значений объемов для ресиверов ГО и для ВП и обновление значений матрицы $[W]$;

вычисление скоростей изменения объемов

$$\left[\frac{dW}{dt} \right];$$

определение в соответствии с (2) для каждой i -ой емкости нового значения производной dp_i/dt .

Предложенная методика прогнозирования расходов воздуха в подъемном комплексе амфибийных судов на воздушной подушке с помощью имитационного моделирования его работы в штатных режимах их эксплуатации и исследования мореходных качеств, а также комплекс математических моделей, позволяют с высокой точностью выполнять прогнозирование динамики СВПА и имитационное моделирование любых СВПА с 6-тью степенями свободы, что снизит расходы на проектирование и постройку головного СВПА с точно предсказуемыми мореходными качествами и эксплуатационными характеристиками.

ЛИТЕРАТУРА
REFERENCES

1. Зайцев Д.В. Исследование процесса затягивания носового гибкого ограждения без диафрагмы при эксплуатации судна на воздушной подушке на тихой воде / Зайцев Д.В., Зайцев В.В. // 36. наук. праць НУК. – Миколаїв: НУК, – 2008. – № 5 (422). – С. 37 – 41.
2. Зайцев Д.В. Расчет гибкого ограждения с учетом его затягивания в режиме движения судна на воздушной подушке // 36. наук. праць НУК. – Миколаїв: НУК, – 2006. – № 4 (409). – С. 32 – 40.
3. Кользаев Б.А. Справочник по проектированию судов с динамическими принципами поддержания / Кользаев Б.А., Косоруков А.И., Литвиненко В.А. – Л.: Судостроение, 1980. – 472 с.
4. Бенуа Ю.Ю. Основы теории судов на воздушной подушке / Ю.Ю. Бенуа, В.К. Дьяченко, Б.А. Кользаев, В.А. Литвиненко, И.В. Озимов, С.А. Смирнов. – Л.: Судостроение, 1970. – 456 с.
5. Зайцев Д.В., Зайцев В.В., Зайцев Вал.В. Математическая модель кормового рессорного гибкого ограждения СВПА // Інновації в суднобудуванні та океанотехніці // Матеріали VI Міжнародної науково-технічної конференції присвяченої 95-річчю Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова. – Миколаїв: НУК, 2015. – С. 291 – 293.
6. Dmytro Zaytsev, Volodymyr Zaytsev, Pentscho Pentshev. Design Methods of Small Hovercrafts // Black sea 2014: Twelfth international conference on marine sciences and technologies. – Varna, Bulgaria: Varna Scientific and Technical Unions – Varna, – 2014. – P. 107 – 108.
7. Зайцев В.В., Зайцев Вал.В., Лукашова В.В., Лысый А.А. Имитационное моделирование подъемного комплекса судна на воздушной подушке скегового типа в режиме висения без хода // 36. наук. праць НУК. – Миколаїв: НУК, 2015. – № 2 (458). – С. 12 – 16.
8. Зайцев В.В., Зайцев Вал.В., Зайцев Д.В., Лукашова В.В. Прогнозирование динамики и мореходных качеств амфибийных судов на воздушной подушке // Автоматизація суднових технічних засобів: наук.-техн. зб. 2021. – Вип. 27. – Одеса: НУ "ОНМА". – С. 22 – 32. DOI:10.31653/1819-3293-2021-1-27-22-32.

Анотація – Існують різні методики та теорії проектування окремих елементів підйомного комплексу, в основному різних типів гнучких огорожень підйомного комплексу. Однак проектування гнучких огорожень не може проводитися без урахування взаємного

впливу всіх елементів системи, що беруть участь у забезпеченні підйому та руху амфібійних суден на повітряній подушці (СППА) над водною поверхнею. Основні елементи цієї системи – корпус судна, рушії, підйомний комплекс, який включає носове гнучке огородження (НГО), кормове гнучке огородження (КГО), бортові гнучкі огородження (БГО), внутрішнє ГО (подовжній та поперечні кили), нагнітач ПП, що забезпечують подачу повітря в повітряну подушку та ресивери ГО, повітроводні канали. Залежно від величини надлишкового тиску повітря в повітряній подушці, зазорів між гнучким огородженням та водною поверхнею змінюється витрата повітря і відповідно потужність і продуктивність нагнітачів, змінюються надлишкові тиски в ресиверах КГО, НГО, БГО та внутрішнього ГО, змінюється їх форма та напружено-деформований стан. Зміна форми гнучкого огородження призводить до зміни посадки СППА і змінюється швидкість його руху.

У роботі представлено методику прогнозування витрат повітря у підйомному комплексі СППА за допомогою імітаційного моделювання його роботи у штатних режимах їх експлуатації та дослідження морехідних якостей. Розглянуто прогнозування роботи підйомного комплексу автомобільно-пасажирського порома (АПП) на повітряній подушці амфібійного типу "Марал". Розглянуто систему диференціальних рівнянь нерозривності витрат повітря на ПК АПП "Марал", що визначають його стан у кожний момент часу. Наводиться функція для обчислення густини повітря від його надлишкового тиску, а також функція обчислення надлишкового тиску повітря від густини. Представлена математична модель, втілена у програму, дозволяє поглиблено аналізувати динаміку та морехідні якості СППА до завершення їх проектування та до початку будівництва. Розроблено алгоритм прогнозування витрат повітря у підйомному комплексі СППА у штатних режимах їх експлуатації та дослідження морехідних якостей.

Описана методика прогнозування витрат повітря в підйомному комплексі СППА за допомогою імітаційного моделювання його роботи в штатних режимах їх експлуатації та дослідження морехідних якостей, а також комплекс математичних моделей дозволяють з високою точністю виконувати прогнозування динаміки СППА та імітаційне моделювання будь-яких СППА з 6-ма ступенями свободи, що знизить витрати на проектування та будівництво головного СППА з точно передбачуваними морськими якостями та експлуатаційними характеристиками.

Annotation – There are various methods and theories for designing individual elements of the lifting complex, mainly various types of flexible skirts for the hovercraft lifting complex. However, the design of flexible skirts cannot be carried out without taking into account the mutual influence of all elements of the system involved in ensuring the rise and movement of hovercraft above the water surface. The main elements of this system are the ship's hull, propellers, lifting complex, which includes a bow flexible skirt, aft flexible skirt, side flexible skirts, an inner flexible skirt (longitudinal and transverse keels), air cushion blowers that supply air to the air cushion and skirt flexible receivers, air ducts. Depending on the amount of excess air pressure in the air cushion, the gaps between the flexible skirt and the water surface, the air flow rate and, accordingly, the power and performance of the blowers change, the excess pressures in the receivers of the aft flexible skirt, the bow flexible skirt, the side flexible skirt, and the inner flexible skirt change, their shape and stress-strain state change. Changing the shape of the flexible skirt leads to a change in the landing of the hovercraft and, accordingly, the speed of its movement changes.

The paper presents a method for predicting air flow in the hovercraft lifting complex using simulation modeling of its operation in normal modes of their operation and the study of seaworthiness. The forecasting of the operation of the lifting complex of the car-passenger amphibious hovercraft "Maral" is considered. The system of differential equations for the continuity of air flow rates in the hovercraft "Maral", which determine its state at each moment of time, is considered. A function is provided for calculating the air density from its excess pressure, as well as a function for calculating the excess air pressure from its density. The presented mathematical model, embodied in the program, allows in-depth analysis of the dynamics and seaworthiness of hovercrafts before the completion of their design and before the start of construction. An algorithm has been developed for predicting air flow in the lifting complex of hovercrafts in their normal operating modes and studying seaworthiness.

The described method for predicting air flow in the lifting complex of hovercrafts using simulation modeling of its operation in normal modes of their operation and the study of seaworthiness, as well as a set of mathematical models, make it possible to predict the dynamics of hovercrafts with high accuracy and simulation modeling of any hovercrafts with 6 degrees of freedom, which will reduce the cost of designing and building a head hovercraft with precisely predictable seaworthiness and performance.

УДК 613.165–614.7

ARTICLE HISTORY

Received 03.03.2023

Accepted 13.03.2023

Карпілов Олександр Юрійович
НУ «Одесская морская академия», Одесса, Украина
kau@gmail.com

Пристрій для контролю ультрафіолетового випромінювання

Karpilov Oleksandr
NU “Odessa Maritime Academy”, Odessa, Ukraine
kau@gmail.com

Device for the control of ultraviolet radiation

Резюме – Ультрафіолетове випромінювання (УФВ) є одним з головних фізичних факторів, що визначають плин життєвих процесів. Поряд з головним джерелом УФВ – Сонцем, у різноманітних сферах життєдіяльності людини застосовуються штучні джерела УФВ, що відрізняються за спектральним складом та потужністю. УФВ є підґрунтям для багатьох біологічних процесів у організмах людей та тварин, що обумовлює актуальність досліджень в галузі створення вимірювальних перетворювачів, що забезпечують отримання достовірної інформації. Другим чинником, що сприяє розробці та впровадженню вимірювальних перетворювачів цього класу, є збільшення УФВ в діапазоні 0,280 ... 0,315 мкм в наслідок деструкції озонового шару Землі.

Abstract – Ultraviolet radiation (UVR) is one of the main physical factors that determine the course of life processes. Along with the main source of UVA, the Sun, artificial sources of UVA are used in various areas of human activity, differing in spectral composition and power. UVB is the basis for many biological processes in human and animal organisms, which makes research in the field of developing measuring transducers that provide reliable information relevant. The second factor that contributes to the development and implementation of measuring transducers of this class is the increase in UVB in the range of 0.280 ... 0.315 μm due to the destruction of the Earth's ozone layer.

DOI: 10.31653/1819-3293-2023-1-28-30-38

Ультрафіолетове випромінювання (УФВ) є одним з головних фізичних факторів, що визначають плин життєвих процесів. Поряд з головним джерелом УФВ – Сонцем, у різноманітних сферах життєдіяльності людини застосовуються штучні джерела УФВ, що відрізняються за спектральним складом та потужністю. УФВ є підґрунтям для багатьох біологічних процесів у організмах людей та тварин, що обумовлює актуальність досліджень в галузі створення вимірювальних перетворювачів, що забезпечують отримання достовірної інформації. Другим чинником, що сприяє розробці та впровадженню вимірювальних перетворювачів цього класу, є збільшення УФВ в діапазоні 0,280 ... 0,315 мкм в наслідок деструкції озонowego шару Землі [1, 2].

У той же час, застосування існуючих пристроїв вимірювання УФВ виявило їх недостатню надійність та ефективність при контролі властивостей випромінювання у спеціальних експлуатаційних умовах [1 – 4].

Для пошуку шляхів поліпшення характеристик пристроїв контролю УФВ були проаналізовані дві конструкції найпоширеніших вимірювальних пристроїв [3 – 5].

Відомий, піранометр, що складається з корпусу із кришкою, що пересувається, коліматора, оптичного фільтру та фотодіоду [3].

Недоліки пристрою, які обумовлені застосуванням коліматора та оптичного фільтру у приладі:

- не дозволяє оцінити рівень сонячної радіації з усієї півсфери небозводу, виміряється тільки загальна, пряма й неухважна сумарна сонячна радіація, що приходить на горизонтальну поверхню;

- залежність достовірності вимірювання від температури навколишнього середовища;

- необхідність постійного захисту та підтримання геометрії вимірювального тракту в умовах впливу експлуатаційних факторів;

- необхідність розбирання приладу для заміни оптичного фільтру.

Найбільш досконалим за технічною сутністю та результатами, що досягається при вимірюванні, є піранометр, що містить корпус, світлофільтр, об'єктив, що представляє собою систему із чотирьох лінз, установлену в корпусі, фотодіод, екран, обертовий механізм з покрововим двигуном та додаткову оптику [4].

Недоліки пристрою, які обумовлені застосуванням системи лінз, окремого світлофільтру, екрану, обертового механізму з покрововим двигуном та додатковою оптикою:

- надмірні складності при вводі акустичної хвилі до одиночного світловоду;

недостатня ефективність модуляції випромінювання у світловоді;
 необхідність вживання додаткових мір по захисту великої кількості оптичних поверхонь в умовах впливу експлуатаційних факторів;
 неможливість урахування впливу експлуатаційних факторів на результати вимірювання.

Аналіз можливостей модернізації вищезгаданих пристроїв показав, що найбільш доцільною є розробка нового пристрою контролю УФВ. Передбачалося, що конструктивне виконання на основі волоконно-оптичних елементів повинне забезпечити вимірювальному пристрою:

відсутність вживання додаткових мір по захисту оптичних елементів в умовах впливу експлуатаційних факторів;

відсутність електромеханічного приводу;

стабільність функціонування в умовах коливань параметрів навколишнього середовища;

надійність, чутливість та простота схемотехнічних рішень пристроїв відомих типів.

Для розв'язування поставленої задачі запропонована схема волоконно-оптичного датчику октанового числа.

Суть запропонованого схемотехнічного рішення пояснюється кресленням (рис. 1).

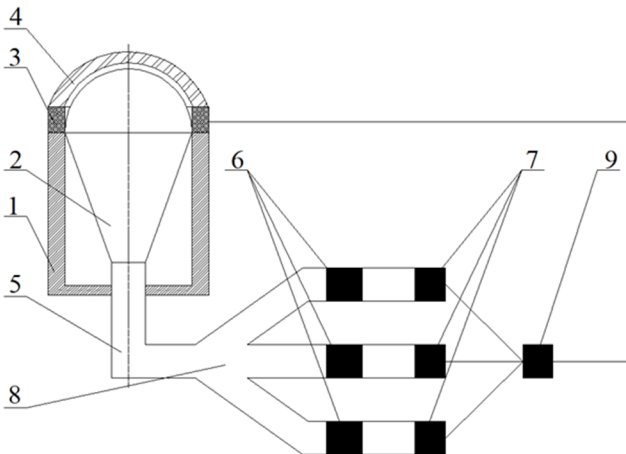


Рис. 1. Волоконно-оптичний піранометр: 1 – корпус; 2 – фокус; 3 – п'єзоелектричні перетворювачі; 4 – сегментна напівсферична кришка; 5 – волоконний світловод; 6 – волоконно-оптичні фільтри; 7 – фотодіоди; 8 – розгалужувач; 9 – блок керування

Ультрафіолетове випромінювання надходить через напівсферичну кришку в режимі "відкриті всі сегменти" на прийомну апертуру фокону спеціальної форми типу "усе небо".

Після проходження фокона й оптичних фільтрів випромінювання надходить до приймачів. Приймачами ультрафіолетового випромінювання є фотодіоди зі смугою чутливості в діапазоні 240 ... 380 нм. Оптичні фільтри, являють собою волоконний световод із блоком *C/G* – лінз і забезпечують смугу пропускання 295 ... 300, 300 ... 305 і 305 ... 310 нм.

Залежно від смуги поглинання фотодіода й оптичних фільтрів змінюється спектральний діапазон виміру сумарної сонячної радіації. Черговість опитування фотодіодів задається блоком керування [5 – 9].

Піранометр дозволяє вимірювати не тільки сумарну, але й пряму радіацію. Для цього в конструкції приладу передбачена сегментна напівсферична кришка, виконана з акустооптичного матеріалу й керована п'єзоелектричними перетворювачами. Сегменти, на які впливають п'єзоелектричні перетворювачі, змінюють свій показник переломлення й стають непроникні для ультрафіолетового випромінювання.

У момент, коли сегменти закривають сонячний диск, вихідний струм фотодіода буде відповідати розсіяній сонячній радіації. Різниця струмів фотодіода із закритим сонячним диском і загальним струмом визначає потужність прямої сонячної радіації.

У статичному режимі піранометра сегментна напівсферична кришка перебуває в стані "відкриті всі сегменти". У цьому режимі вимірюється по черзі струм фотодіодів, який, у відповідній смузі, буде пропорційний загальній сонячній радіації у вимірюваному діапазоні довжин хвиль у теперішній момент часу. У блоці керування фіксуються всі виправлення, обумовлені впливом параметрів навколишнього середовища.

У динамічному режимі блок керування формує керуючий вплив на п'єзоелектричні перетворювачі. Останні впливають на сегменти кришки, виконані з акустооптичного матеріалу. Під впливом п'єзоелектричних перетворювачів відбувається зміна показника переломлення сегментів – вони починають блокувати проникнення ультрафіолетового випромінювання. Далі відбувається перекриття, із кроком в один градус, поверхні кришки для доступу ультрафіолету до фокону. Після кожного кроку вимірюється струм фотодіодів. Після 180 кроків обчислюється мінімальне значення струму, що буде відповідати розсіяній сонячній радіації. Пряма сонячна радіація обчислюється шляхом вирахування із загальної сонячної радіації величини розсіяної

[5 – 9].

Таким чином, відбувається повний цикл вимірювання.

Запропоноване схемотехнічне рішення відрізняється тим, що корпус, виконаний з кварцового скла, має прозору сегментну напівсферичну кришку, виконану з акустооптичного матеріалу, чий показник переломлення змінюється п'єзоелектричними перетворювачами. УФВ крізь кришку надходить до фокону з ітербієвого скла, один кінець якого має лінзову форму, а другий сполучений з волоконним світловодом. Світловод зв'язаний за допомогою волоконно-оптичного розгалужувача та трьох волоконно-оптичних фільтрів з трьома фотодіодами.

Таким чином, в розробленому піранометру комбінація оптичних та п'єзоелектричних елементів забезпечує:

підвищення чутливості та точності вимірювання ультрафіолетового сонячного випромінювання;

можливість оцінки рівня ультрафіолетового сонячного випромінювання зі всієї півсфери небосхила;

підвищення якості функціонування за рахунок застосування фокону з ітербієвого скла спеціальної форми замість системи лінз;

компенсацію впливу неконтрольованих експлуатаційних та кліматологічних факторів на вимірювальний канал завдяки зменшенню конструктивних елементів та використання термостабільних матеріалів;

відсутність необхідності вживання додаткових мір по захисту великої кількості оптичних поверхонь в умовах впливу експлуатаційних факторів;

відсутність електромеханічного приводу;

постійне вимірювання у реальному масштабі часу.

Використання пристрою, що пропонується, в системах контролю УФВ дозволить адекватно і достовірно оцінювати кількісні показники випромінювання для прогнозування впливу на процеси життєдіяльності людини.

ЛИТЕРАТУРА REFERENCES

1. Бутенко, В.К., Добровольский, Ю.Г., Шабашкевич, Б.Г., Юрьев, В.Г. Дозиметры энергетической освещенности ультрафиолетового излучения типа "Тензор". // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. –2006. – Одесса: ОНПУ. – С. 43 – 45.

2. Моргунов, В. Н. Основы метеорологии, климатологии: учебник

для вузов / В. Н. Моргунов. – Ростов-на-Дону: Феникс, 2005. – 331 с.

3. Pat. FR 2685767 A1 France. Un dispositif de mesure d'intensité de rayonnement solaire ultraviolet direct et total.

4. Пат. 97193 Российская Федерация, МПК МПК7: G01J1. Пиранометр для измерения ультрафиолетовой солнечной радиации / А.В. Козлов, Б.Д. Белан, Е.В. Жидовкин; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева Сибирского отделения Российской академии наук; опубл. 27.08.2010.

5. Гуляев, Ю.В., Меш, М.Я., Проклов, В.В. Модуляционные эффекты в волоконных световодах и их применение. – М.: Радио и связь, 1991. – 150 с.

6. Рыбалтовский, А.А., Бугов, О.В. Савельев, Ю.К., Чаморовский, Ю.К. Фоточувствительность иттербиевых волоконных световодов с сердцевиной из кварцевого стекла с добавкой алюминия и фосфора. // Письма в ЖТФ, 2016. – Т. 42. – Вып. 10. – С. 1 – 8.

7. Бусурин, В.И., Носов, Ю.Р. Волоконно-оптические датчики: физические основы, вопросы расчета и применения. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 256 с.

8. Сандлер, А.К. Моделирование акселерометра маятникового типа. // Вісник Черкаського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки. – 2019. – № 1. – Черкаси: ЧДТУ. – С. 75 – 81.

9. Сандлер, А.К. Чувствительный элемент волоконно-оптического акселерометра на основе сапфирового стекла. // IX міжнародна науково-методична конференція "Суднова електроінженерія, електроніка і автоматика", 05 – 06 листопада 2019 р.: матеріали конференції. – Одеса: НУ "ОМА". – 2019. – С. 27 – 33.

Анотація – Ультрафіолетове випромінювання (УФВ) є одним з головних фізичних факторів, що визначають плин життєвих процесів. Поряд з головним джерелом УФВ – Сонцем, у різноманітних сферах життєдіяльності людини застосовуються штучні джерела УФВ, що відрізняються за спектральним складом та потужністю. УФВ є підґрунтям для багатьох біологічних процесів у організмах людей та тварин, що обумовлює актуальність досліджень в галузі створення вимірювальних перетворювачів, що забезпечують отримання достовірної інформації. Другим чинником, що сприяє розробці та впровадженню вимірювальних перетворювачів цього класу, є збільшення УФВ в діапазоні 0,280 ... 0,315 мкм в наслідок деструкції озонового шару Землі.

У той же час, застосування існуючих пристроїв вимірювання УФВ виявило їх недостатню надійність та ефективність при контролі властивостей випромінювання у спеціальних експлуатаційних умовах.

Для пошуку шляхів поліпшення характеристик пристроїв контролю УФВ були проаналізовані дві конструкції найпоширеніших вимірювальних пристроїв.

Аналіз можливостей модернізації вищезгаданих пристроїв показав, що найбільш доцільною є розробка нового пристрою контролю УФВ. Передбачалося, що конструктивне виконання на основі волоконно-оптичних елементів повинне забезпечити вимірювальному пристрою:

відсутність вживання додаткових мір по захисту оптичних елементів в умовах впливу експлуатаційних факторів;

відсутність електромеханічного приводу;

стабільність функціонування в умовах коливань параметрів навколишнього середовища;

надійність, чутливість та простота схемотехнічних рішень пристроїв відомих типів.

Для розв'язування поставленої задачі запропонована схема волоконно-оптичного датчику октанового числа.

Запропоноване схемотехнічне рішення відрізняється тим, що корпус, виконаний з кварцового скла, має прозору сегментну напівсферичну кришку, виконану з акустооптичного матеріалу, чий показник переломлення змінюється п'єзоелектричними перетворювачами. УФВ крізь кришку надходить до фокону з ітербієвого скла, один кінець якого має лінзову форму, а другий сполучений з волоконним світловодом. Світловод зв'язаний за допомогою волоконно-оптичного розгалужувача та трьох волоконно-оптичних фільтрів з трьома фотодіодами.

В розробленому піранометру комбінація оптичних та п'єзоелектричних елементів забезпечує:

підвищення чутливості та точності вимірювання ультрафіолетового сонячного випромінювання;

можливість оцінки рівня ультрафіолетового сонячного випромінювання зі всієї півсфери небосхила;

підвищення якості функціонування за рахунок застосування фокону з ітербієвого скла спеціальної форми замість системи лінз;

компенсацію впливу неконтрольованих експлуатаційних та кліматологічних факторів на вимірювальний канал завдяки зменшенню конструктивних елементів та використання термостабільних матеріалів;

відсутність необхідності вживання додаткових мір по захисту

великої кількості оптичних поверхонь в умовах впливу експлуатаційних факторів;

відсутність електромеханічного приводу;

постійне вимірювання у реальному масштабі часу.

Використання пристрою, що пропонується, в системах контролю УФВ дозволить адекватно и достовірно оцінювати кількісні показники випромінювання для прогнозування впливу на процеси життєдіяльності людини.

Annotation – Ultraviolet radiation (UVR) is one of the main physical factors that determine the course of life processes. Along with the main source of UVA, the Sun, artificial sources of UVA are used in various areas of human activity, differing in spectral composition and power. UVB is the basis for many biological processes in human and animal organisms, which makes research in the field of developing measuring transducers that provide reliable information relevant. The second factor that contributes to the development and implementation of measuring transducers of this class is the increase in UVB in the range of 0.280 ... 0.315 μm due to the destruction of the Earth's ozone layer.

At the same time, the use of existing UVB measuring devices has revealed their insufficient reliability and efficiency in controlling the properties of radiation in special operating conditions.

To find ways to improve the characteristics of UVB control devices, two designs of the most common measuring devices were analyzed.

The analysis of the possibilities of modernizing the above-mentioned devices showed that the most appropriate is the development of a new UVB monitoring device. It was assumed that the design based on fiber-optic elements should provide the measuring device with:

no additional measures to protect optical elements under the influence of operational factors;

absence of an electromechanical drive;

stability of functioning in conditions of fluctuations in environmental parameters;

reliability, sensitivity and simplicity of circuitry solutions for devices of known types.

To solve this problem, a scheme of a fiber-optic octane sensor is proposed.

The proposed circuitry solution differs in that the body, made of quartz glass, has a transparent segmental hemispherical cover made of acousto-optical material, whose refractive index is changed by piezoelectric transducers. The UVB is transmitted through the cover to a ytterbium glass

phocone, one end of which has a lens shape and the other is connected to a fiber optic light guide. The light guide is connected by a fiber optic splitter and three fiber optic filters to three photodiodes.

In the developed pyranometer, the combination of optical and piezoelectric elements provides:

increased sensitivity and accuracy of ultraviolet solar radiation measurement;

the ability to assess the level of ultraviolet solar radiation from the entire hemisphere of the sky;

improving the quality of functioning by using a specially shaped ytterbium glass phocone instead of a lens system;

compensation for the influence of uncontrolled operational and climatic factors on the measuring channel due to the reduction of structural elements and the use of thermostable materials;

no need to take additional measures to protect a large number of optical surfaces under the influence of operational factors;

absence of electromechanical drive;

continuous measurement in real time.

The use of the proposed device in UVB control systems will allow to adequately and reliably assess the quantitative indicators of radiation to predict the impact on human life processes.

УДК 621.824.539.4

ARTICLE HISTORY

Received 09.03.2023

Accepted 17.03.2023

Кобзарук Олександр Васильович¹, Бабінець Валерій Іванович²,
Опарін Анатолій Володимирович³, Смажило Богдан Васильович⁴
Одеський національний морський університет, Одеса, Україна^{1, 4},
Чорноморськ, Україна²,
НУ «Одеська морська академія», Одеса, Україна³,
al38od@i.ua¹, babinecvalerij@gmail.com²,
avoparin@ukr.net³, bogdan@gmail.com⁴

Технологія протикорозійного захисту поверхонь між шийками суднових гребних валів

Kobzaruk Olexander¹, Babinets Valery²,
Oparin Anatoly³, Smazhylo Bogdan⁴
Odessa National Maritime University, Odesa, Ukraine^{1, 4},
Chornomorsk, Ukraine²,
National University «Odessa Maritime Academy»³,
al38od@i.ua¹, babinecvalerij@gmail.com², avoparin@ukr.net³,
bogdan@gmail.com⁴

Technology of anti-corrosion protection of the surfaces between the necks of ship rear shafts

Резюме – Пропонується технологія захисту від корозійно-механічного пошкодження поверхонь суднових гребних валів в проміжках між робочими шийками ізоляційною стрічкою, що термоусаджується. Проведені випробування фізико-механічних властивостей захисного матеріалу, його водопоглинання та стійкості до корозійно-біологічного впливу морської води. Корозійно-втомні випробування дослідних зразків з покриттям та без нього здійснено у природній морській воді на базі 50·10⁶ циклів. Дослідженнями показана висока надійність захисту неробочих шийок суднових гребних валів від корозійно-втомних пошкоджень в морській воді. Технологія захисту опробувана на судноремонтних підприємствах та схвалена класифікаційним товариством.

Abstract – The technology of protection against corrosion-mechanical

damage to the surfaces of ship propeller shafts between its working necks with a heat-shrinkable insulating tape is presented. The physical and mechanical properties of the protective material, its water absorption, and resistance to the corrosion and biological effects of sea water were tested. Corrosion-fatigue tests of prototypes in seawater were carried out based on 50-10⁶ cycles. Tests have shown the high reliability of protection of non-working journals of marine propeller shafts from corrosion-fatigue damage in seawater. The protection technology was tested at shipyards and approved by classification society.

DOI: 10.31653/1819-3293-2023-1-28-39-51

Гвинторульовий комплекс є одним з важливих облаштувань судна. Знос одного з його елементів – гребного валу – і втрата свого функціонального призначення призводить до неможливості подальшої експлуатації судна, а в деяких випадках до катастрофи у відкритому морі. Вивченню питання підвищення надійності гвинторульового комплексу судна і збільшення експлуатаційного терміну його служби присвячено безліч робіт вітчизняних і зарубіжних учених [1 – 7]. Корозійно-втомне руйнування валу відбувається при одночасній дії змінної напруги і агресивного середовища [8]. Для звичайного втомного руйнування, як правило, окрім основної тріщини втоми, по якій відбувається руйнування, ніяких інших тріщин не спостерігається. При корозійно-втомному руйнуванні в зоні дії однакової напруги зазвичай спостерігається велика кількість тріщин корозійної втоми. В результаті місцевої мікропластичної деформації, що протікає при циклічних діях як вище, так і нижче межі втоми, в окремих найбільш слабких мікрооб'ємах металу відбувається розблагороджування цих мікрооб'ємів. Міра цього процесу (величина негативного електродного потенціалу) значно зростає завдяки тому, що взаємодія з корозійним середовищем відбувається в процесі мікропластичної деформації, тобто в процесі переміщення атомів. В цьому випадку набагато полегшується вихід іон-атомів з металу в розчин.

Це призводить до появи, в процесі корозійної втоми осередків з великою електрохімічною неоднорідністю, в яких зароджуються і розвиваються тріщини корозійно-втомного походження.

Тому для захисту від зниження корозійно-втомної міцності необхідне усунення або зменшення дії корозійного чинника. Найкращим рішенням в цьому випадку є підвищення корозійно-втомної міцності до її значення на повітрі [9].

Гребний вал представляє собою циліндричну цілісну або порожнисту ступінчасту балку, на якій знаходяться конуса, виточки,

штопочні пази, отвори, галтелі і інші конструктивні елементи, що є концентраторами напруги. В процесі експлуатації навантаження, що діють на вал, і дія морської води істотно знижують межу витривалості матеріалу валу.

Одним з найбільш поширених способів захисту гребних валів від дії морської води є електролітичне хромування його поверхні. Хромування відноситься до катодних покриттів, що мають позитивніший потенціал, ніж потенціал металу, що захищається.

Багато гальванічних покриттів знижують витривалість середньовуглецевої сталі на повітрі на 10 ... 35 % і більше. Хромування негативно впливає на опір втоми сталі не тільки на повітрі, а й у такому агресивному середовищі, як 3 % розчин NaCl або морська вода. Гальванічне хромування, незалежно від методів та режимів його здійснення, не забезпечує помітного підвищення опору корозійно-втомному руйнуванню через високу пористість покриття. Про суттєвий вплив наводорожування на зниження витривалості валів з гальванічним покриттям свідчить і те, що зі збільшенням товщини хромового покриття в інтервалі 0,3 ... 3,0 мм, опір втоми зразків діаметром 10 мм знижується. З іншого боку, в осаджених електролітичних шарах хрому виникають значні залишкові напруги розтягування, що іноді досягають межі плинності, які здатні викликати появу мікроскопічних тріщин. Ці тріщини не тільки стають концентраторами напруги, але, виходячи на поверхню хромового покриття, відкривають доступ до основного металу зовнішнього середовища, викликаючи його корозію. При цьому міцність зчеплення хромового покриття із поверхнею валу різко зменшується. Відбувається відшаровування локальних ділянок покриття, що порушує геометрію хромованих поверхонь. Тому гальванічні катодні покриття не рекомендується застосовувати для захисту від корозійно-втомного руйнування гребних валів, що працюють при одночасній дії змінних напруг і корозії. Одним із способів підвищення корозійно-втомної міцності хромованих гребних валів є їх поверхневе зміцнення. Встановлено що, якщо перед електролітичним хромуванням поверхню гребного валу, що захищається, зміцнити вібродинамічним способом, то залишкові напруги стиснення алгебраїчно підсумовуючись з залишковими напругами розтягування від електролітичного хромування, можуть значно підвищити опір втоми, в тому числі і корозійної.

Результати випробувань на втому показують, що хромування без попереднього зміцнення на 46 % знижують межу витривалості матеріалу на повітрі та практично дорівнює вихідному матеріалу, випробуваному в морській воді. При попередньому динамічному

зміцненні поверхні перед хромуванням [10, 11] межа витривалості хромованих зразків, випробуваних у морській воді, наблизилась до межі витривалості вихідного (не хромованого) матеріалу, випробуваного на повітрі. Але на практиці зустрічаються конструкції гребних валів, поверхню яких захистити в такий спосіб неможливо чи нанесення протикорозійного захисту пов'язане з технологічними труднощами [12]. Наприклад, захист гребного валу завдовжки понад 20 м (рис. 1).

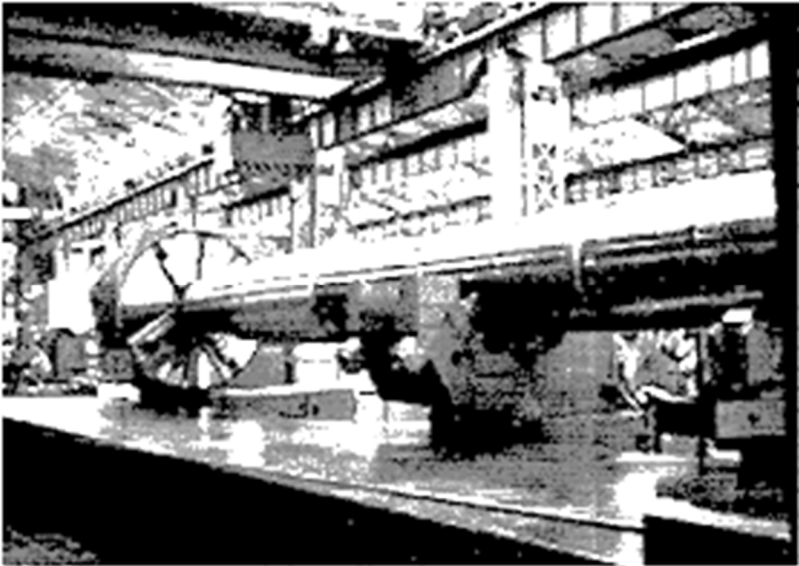


Рис 1. Гребний вал великотоннажного судна на токарному верстаті

Одним з таких способів захисту поверхонь виробів машинобудування від корозії є застосування термоусаджувального пластмас – радіаційно вулканізованого поліетилену, виконаного, наприклад, у вигляді ізоляційної стрічки, що термоусаджується. Застосування термоусаджувальної ізоляційної стрічки, як показала практика, є доцільним для захисту зовнішніх поверхонь гребних валів великої довжини.

Метою даної роботи є розробка технології протикорозійного захисту поверхні гребного валу між його робочими шийками.

Для розробки технології протикорозійного захисту поверхні гребного валу між його робочими шийками були проведені

дослідження фізико-механічних властивостей матеріалу, що застосовується для захисту валу і корозійно-втомні випробування моделей валів з використанням, для їх захисту, ізоляційної стрічки ЛПІ 823, що термоусаджується. Стрічка являє собою рулонний двошаровий матеріал, що складається з основи та адгезиву, виготовлений методом співекструзії. Базовим матеріалом основи є поліетилен високої густини. Адгезив виготовляється на основі сополімеру етилену з вінілацетатом із вмістом вінілацетатних груп.

Стрічка, що виготовляється, має товщину основи 0,6 ... 0,8 мм і адгезиву 0,3 ... 0,5 мм. Ширина стрічки 450 мм та довжини в рулоні 80 м. Стрічка експлуатується в інтервалі температур від -45°C до $+80^{\circ}\text{C}$. Адгезія підшару до очищеної поверхні гребного валу (з севіленовою композицією) становить 9 ... 12 МПа.

Основа ізоляційної стрічки, нанесеної на гарячу поверхню гребного валу, має високу міцність і стійкість до розтріскування в морській воді.

З метою вибору оптимального режиму нагрівання валу при формуванні міцного адгезійного шару системи «вал-покриття» проведено випробування залежності міцності адгезійного з'єднання стрічки з поверхнею сталі за різних температур і часу формування шару покриття (табл. 1).

Таблиця 1

Міцність адгезійної сполуки

Температура формування, $^{\circ}\text{C}$	Міцність адгезійного шару, МПа
100	1,9
110	4,2
120	8,3
130	10,5
150	11,3
170	11,5
190	11,4

Вже при температурі 120°C міцність адгезійного з'єднання становить 8 МПа, що достатньо для міцності зчеплення стрічки з поверхнею, гребного валу, що захищається. Зростання температури до $150 \dots 170^{\circ}\text{C}$ значно підвищує величину адгезійної міцності, але подальше підвищення температури мало впливає на неї.

Залежність міцності адгезійного з'єднання стрічка-сталь від часу при температурі формування 170°C показана в табл. 2.

Таблиця 2

Залежність міцності від часу формування

Час формування, хв.	5	10	15	20	30	45
Міцність адгезійної сполуки, МПа	10,1	11,0	11,5	12,2	12,3	16,8

Судячи з цих даних для формування міцної адгезійної сполуки досить 5 хв. Показано, що порівняно невисока температура формування адгезійної сполуки (150 °С) забезпечує не тільки досить великі значення міцності адгезійної сполуки, але і високу її водостійкість. У цьому відношенні стрічка ЛПІ 823 вигідно відрізняється від більшості імпортних матеріалів аналогічного призначення.

При вивченні захисних властивостей ізоляційної двошарової стрічки було приділено увагу водопоглинанню, здатності сорбувати воду. Залежність водопоглинання від часу витримки та температури розчину показано у табл. 3.

Таблиця 3

Водопоглинання стрічки

Температура, °С	Водопоглинання, %, за час витримки		
	1 доба / 24 час	10 діб / 240 час	42 доби / 1008 час
20	0,14	0,19	0,22
40	0,22	0,32	0,32
100	0,65	1,50	6,11

Високі значення водопоглинання полімерних матеріалів при підвищених температурах пояснюються великою концентрацією гідроксильних функціональних груп композиції (аміно- і гідроксильних), наявності в обсязі полімеру деякої кількості порожнин, пов'язаних з частковим випаром продукту АГМ-9 в процесі переробки грануляту в стрічку в екструдері. Але при не надто високих температурах експонування (як у разі експлуатації гребних валів) сорбція води протікає лише незначною мірою.

З метою виявлення ефективності застосування полімерних покриттів для захисту гребних валів, що працюють в режимі змінних навантажень та в агресивному середовищі (морська вода), були проведені випробування чотирьох серій зразків (табл. 4).

Нормалізовані (нагрівання до 870 °С, охолодження на повітрі) циліндричні зразки Ø 27 мм з довжиною робочої частини 125 мм і загальною довжиною 285 мм зі сталі 45 випробовували на втому при чистому вигині на машині ФМІ-30 в природній морській воді, частотою 50 Гц і базі випробувань 50 · 106 циклів. Частина зразків випробовувалася у вихідному стані, інша частина із захистом термоусаджувальною полімерною стрічкою, третя без антикорозійного захисту, але з вібродинамічним зміцненням зовнішньої поверхні зразків і четверта з вібродинамічним зміцненням поверхні зразків, захищених стрічкою, що термоусаджується. Робоча поверхня частини зразків захищалася стрічкою таким чином, щоб торець захисного покриття був у зоні контакту з морською водою.

Таблиця 4
Фізико-хімічні та механічні властивості термоусаджувальної стрічки

Найменування параметрів, одиниці виміру	Норма з технологічної документації	Фактичне значення якості зразків
Руйнівна напруга при розтягуванні при 10 °С, МПа	не менше 120	140
Розривне подовження при 20 °С, %	не менше 300	600
Ступінь повної усадки в подовжньому напрямку при 120 °С, %	10 ... 30	30 ... 35
Зміна розміру в поперечному напрямку при 120 °С, %	не більше ±5	-5
Адгезійна міцність до сталі (формування при 170 °С протягом 15 хв.), МПа	не нижче 3,5	9 ... 12
Адгезійна міцність до заводського покриття, МПа	не нижче 3,5	8 ... 11
Температура крихкості, °С	не нижче -50	не вище -50

Метою таких випробувань була перевірка герметичності адгезиву стрічки при дії середовища та змінних навантажень. Всі випробування проводилися в проточній морській воді, що забирається з моря безпосередньо у видатковий бак, звідки самопливом вона надходила на спеціальний гребінець з отворами на робочу поверхню зразка, за нормальної температури лабораторного повітря (18 ... 22 °С).

Циркуляція корозійного середовища проводилася зі швидкістю 3 л/хв. У процесі випробувань робоча частина зразка безперервно зрощувалася, внаслідок чого при працюючій установці на зразку утворювалася повітряно водяна плівка.

Результатом втомних випробувань показано, що межа корозійної втоми вихідних зразків без зміцнення та захисту на базі $50 \cdot 10^6$ циклів у морській воді становила 80 МПа; не зміцнених та захищених термострічкою – 100 МПа; зміцнених без захисту – 220 МПа; зміцнених із полімерним захистом – 240 МПа; вихідних зразків на повітрі – 260 МПа. Межа витривалості зразків з вихідною поверхнею, захищеною стрічкою, що термоусаджується, і випробуваних у морській воді, склала 250 МПа. Незначне зниження опору втоми можна пояснити шорсткістю поверхні, необхідної підготовки поверхні перед нанесенням термострічки.

Обстеження робочої поверхні, що пройшли випробування зразків із захисним покриттям, показало, що проникнення середовища під захисне покриття не було. Адгезійний підшар надійно з'єднує полімерний захисний шар з металевою поверхнею валу.

Були також проведені порівняльні випробування фізико-механічних характеристик термоусаджувальної ізоляційної стрічки у вихідному стані та після випробувань протягом 25 діб на біостійкість для вирішення питання про стійкість полімерів до корозійно-біологічного впливу морської води. Випробування на біостійкість проведені в середовищі з асоціативною культурою бактерій, що моделюють умови, що складаються під багаторічним обростанням [13].

Висновки. В результаті проведених випробувань можна зробити такі висновки:

захисна стрічка анізотропна – п характеристики міцності зразків стрічки у взаємно перпендикулярному напрямку відрізняються один від одного приблизно на 30 %, пластичні властивості – на 10 ... 15 %;

міцність зразків плівки після випробувань на біостійкість зменшилася незначно та становить близько 90 % від міцності плівки у вихідному стані, відносна залишкова деформація збільшилася приблизно на 80 %;

випробуваннями показано доцільність та ефективність застосування, як захист, термоусаджованої ізоляційної стрічки для підвищення довговічності та надійності гребних валів в експлуатаційних умовах.

Вперше використання антикорозійного захисту гребних валів термоусаджувальною ізоляційною стрічкою в один шар випробувано на практиці, при ремонті заводського буксиру та одного із суден

рибного флоту, на двох судноремонтних підприємствах. Ця технологія була схвалена класифікаційним товариством і рекомендована як заміна епоксидно-скловолокнистого захисту гребних валів між робочими шийками.

Застосування технології нанесення антикорозійного покриття включає режим очищення не робочих поверхонь гребного валу в циліндричній його частині, технологічні параметри нагріву і режим нанесення термоусаджувальної стрічки, а також вимоги безпеки при проведенні робіт.

Для можливості реалізації технології антикорозійного захисту валів необхідно мати виробниче приміщення для дробоструминного очищення гребних валів та виробничі площі для нанесення захисного покриття.

Приміщення, де проводиться нанесення покриття, має бути облаштовано:

токарним верстатом, що дозволяє обертати вал різної довжини під час нагрівання та нанесення покриття;

припливно-витяжною вентиляцією;

індукційним нагрівачем або іншим джерелом струму високої частоти, що забезпечує нагрівання поверхні валу з подальшим нанесенням термоусаджувальної ізоляційної стрічки (рис. 2);

підйомним краном для встановлення гребного валу на верстат та можливості його подальшого транспортування.

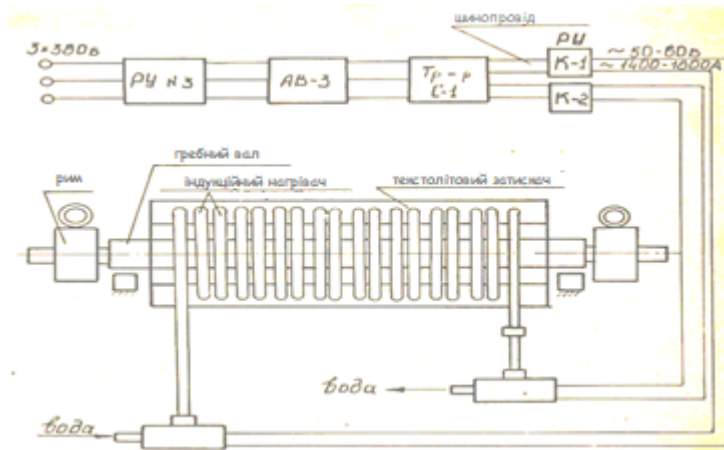


Рис. 2. Принципова схема підключення індукційного нагрівача

Технологія нанесення захисного покриття

Нанесення захисного покриття ЛПІ-823 доцільно здійснювати в наступній послідовності:

попереднє знежирення валу від мастил шляхом протирання ганчіркою, змоченою одним із розчинників (бензин ГОСТ 3134-78, бензин БР-1 ГОСТ 443-76 та ін.);

очищення гребного валу у дробоструминному апараті або за допомогою сталевих циліндричних щіток, що обертаються до отримання поверхні сірого металевого кольору, при цьому бажано наносити покриття відразу після очищення (необхідно ретельно стежити, щоб після очищення на поверхню не потрапили масляні та інші забруднення);

підготовка облицювання згідно зі схемою на рис. 3;

введення нагрівача індуктора на циліндричну частину валу та закріплення його в супорті різцетримача;

знежирення дробоструминних ділянок;

нагрівання циліндричної частини валу індукційним нагрівачем до температури 180 ... 200 °С включивши самохід супорта із закріпленням на ньому індуктором та пройшовши 2 ... 3 проходи у прямому та зворотному напрямку, прибрати індуктор з поверхні валу;

нанесення на підготовлені ділянки валу, що захищаються, термоусаджувальної ізоляційної стрічки намотуванням у два шари з мінімальною товщиною покриття 1 мм;

підготовка облицювання згідно зі схемою на рис. 3, діаметр робочих шийок валу повинен бути більшим за неробочу частину валу, з урахуванням нанесеного захисного шару, на величину не менше ніж 0,5 мм (рис. 4);

нанесення на покриті стрічкою поверхню фторопластову плівку в один шар із натягом;

встановлення індуктору нагріву;

нагрівання валу із нанесеним захисним покриттям до температури 200 ... 210 °С (час витримки за вказаної температури 7 ... 10 хв), вал у процесі нанесення покриття та його природного остигання повинен обертатися;

після остигання покриття до температури 60 °С зняття фторопластової плівки та зняття валу з токарного верстата.

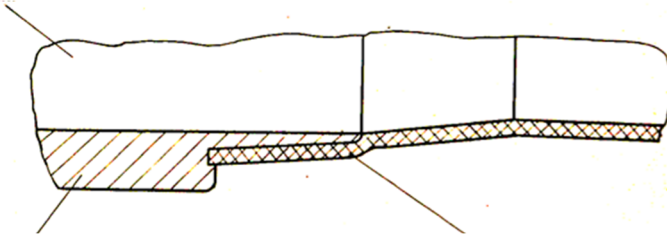


Рис. 3. Схема укладання стрічки

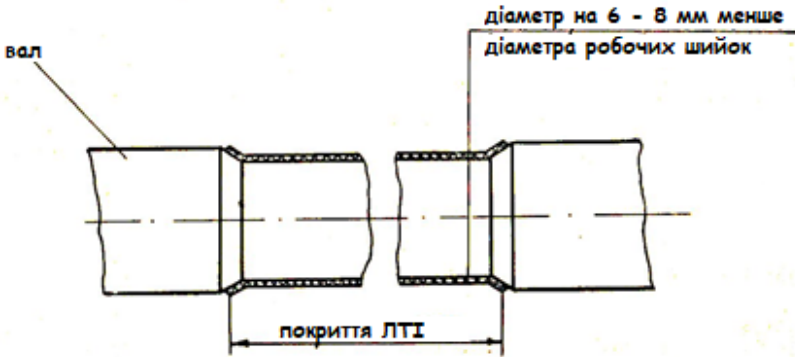


Рис. 4. Укладання стрічки на циліндричну поверхню

Таким чином можна **рекомендувати** наступне.

1. Зовнішню поверхню валів невеликої довжини можна піддавати електролітичному хромуванню з попереднім вібродинамічним поверхневим зміцненням.

2. На зовнішню поверхню довгомірних валів рекомендується наносити антикорозійне покриття у вигляді термоусаджувальної ізоляційної стрічки в один або два шари.

3. Для організації ділянки з нанесення захисного покриття необхідна виробнича площа з підйомно-транспортними засобами по довжині виробу, що обробляється, і шириною приблизно, 8 м, на якій будуть розміщені: токарний верстат, або роликові опори з можливістю передачі виробу обертального руху; пересувний пристрій для дробоструминного очищення поверхні валу, що захищається; стрічкономоточний пристрій; індукційний нагрівач та силовий трансформатор.

ЛІТЕРАТУРА
REFERENCES

1. Балацкий Л.Т. Ремонт гребных валов. – Одесса: Бюро технической информации ЧМП, 1970. – 59 с.
2. Похмурский В.И., Крахмальний А.М., Хома М.С. и др. Повышение сопротивления коррозионной усталости нержавеющей сталей для судовых валов // Тез. докл. Всесоюз. науч.-техн. конф. «Проблемы повышения надёжности судовых валопроводов». – Л.: Судостроение, 1988. – С. 54 – 55.
3. Похмурский В.И., Кравцов Т.Г., Сирак Я.М. Циклическая прочность крупногабаритных образцов валов при наплавке аустенитной сталью по высокопрочному подслою // Тез. докл. Всесоюз. науч. техн. конф. «Проблемы повышения надёжности судовых валопроводов». – Л.: Судостроение, 1988. – С. 56 – 57.
4. Pemberton H.N., Smedly G.P. An Analysis of Resept Screwshaft Casulties. // Transactions of the North East Coast institution of Engineers and Shipbuilders. – 1060. – Vol. 76. – Part 6. – P. 285.
5. Бабінець В.І., Кобзарук О.В., Смажило Б.В. Підвищення опору фретинг-корозійної втоми пресових з'єднань у морській воді // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 2021. – № 57. – С. 68 – 72.
6. Кобзарук А.В., Бабинец В.И. Исследование фреттинг-процессов при циклическом изменении напряженного состояния в пятне контакта // Вісник Одеського національного морського університету: зб. наук. праць. – 2021. – № 2(65). – С. 138 – 151. DOI 10.47049/ 2226-1893-2021-2-138-151.
7. Бабинец В.И., Кобзарук А.В. Ремонт и восстановление судовых гребных валов газопламенным нанесением порошковых покрытий. // Вісник Одеського національного морського університету: зб. наук. праць – 2021. – № 3(66). – С. 49 – 59. DOI 10.47049/ 2226-1893-2021-3-49-59.
8. Карпенко Г.В. Прочность стали в коррозионной среде. – Москва-Киев: «Машгиз», 1963. – 187 с.
9. Похмурський В.І., Хома М.С. Корозійна втома металів і сплавів. – Львів; СПОЛОМ, 2008. – 304 с.
10. Похмурский В.И, Калахан О.С. та ін. Технологія очисно-зміцнювальної підготовки поверхні перед нанесенням захисних покриттів // Цільова комплексна програма НАН України «Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин»: зб. наук. статей. – К: ІЕЗ ім. Е.О. Патона НАН України, 2006. – С. 115 – 119.

11. Табулевич К, Похмурский В.И., Мелехов Р.К., Круцан Р.К. Повышение коррозионно-механической прочности конструкционных элементов методом ППД // Вопросы механики и физических процессов резания и холодного пластического деформирования: сб. трудов. – К.: Ин-т сверхтвёрдых материалов, 2002. – С. 420 – 426.

12. Балацкий Л.Т., Филимонов Г.Н., Саламашенко А.Г. Некоторые мероприятия по увеличению долговечности судовых гребных валов // Судостроение за рубежом. – 1970. – №42. – С. 26 – 50.

13. Кобзарук А.В. Морская коррозия металлов в напряженном состоянии. – Одесса – Херсон: Гринь Д. С., 2014. – 256 с.

Анотація – Пропонується технологія захисту від корозійно-механічного пошкодження поверхонь судових гребних валів в проміжках між робочими шийками ізоляційною стрічкою, що термоусаджується. Проведені випробування фізико-механічних властивостей захисного матеріалу, його водопоглинання та стійкості до корозійно-біологічного впливу морської води. Корозійно-втомні випробування дослідних зразків з покриттям та без нього здійснено у природній морській воді на базі $50 \cdot 10^6$ циклів. Дослідженнями показана висока надійність захисту неробочих шийок судових гребних валів від корозійно-втомних пошкоджень в морській воді. Технологія захисту опробувана на судноремонтних підприємствах та схвалена класифікаційним товариством.

Annotation – The technology of protection against corrosion-mechanical damage to the surfaces of ship propeller shafts between its working necks with a heat-shrinkable insulating tape is presented. The physical and mechanical properties of the protective material, its water absorption, and resistance to the corrosion and biological effects of sea water were tested. Corrosion-fatigue tests of prototypes in seawater were carried out based on $50 \cdot 10^6$ cycles. Tests have shown the high reliability of protection of non-working journals of marine propeller shafts from corrosion-fatigue damage in seawater. The protection technology was tested at shipyards and approved by classification society.

УДК 629.5

ARTICLE HISTORY

Received 20.02.2023

Accepted 27.02.2023

Мадей Володимир Васильович¹, Волков Олександр Миколайович²,
Сагін Сергій Сергійович³
НУ «Одеська морська академія», Одеса, Україна
v.madey@gmail.com¹, shvolk81@gmail.com¹,
sergeysagin20@gmail.com³

Корегування навігаційного переходу під час забезпечення екологічних показників роботи суднових дизелів

Madey Volodymyr¹, Volkov Oleksandr², Sagin Sergii³
NU "Odessa Maritime Academy", Odessa, Ukraine
v.madey@gmail.com¹, shvolk81@gmail.com¹,
sergeysagin20@gmail.com³

Correction of the navigation passage while ensuring the environmental performance of marine diesel engines

Резюме – Розглянута можливість корегування навігаційного переходу судна класу General Cargo дедвейтом 10820 т між портами Бразилії та Карибського басейну з урахуванням забезпечення постійної роботи суднових чотиритактних дизелів 5DC-17A фірми Daihatsu Diesel на суміші моторного палива та біопалива. Експериментально доведено, що при цьому підвищується екологічність роботи суднових дизелів.

Abstract – The possibility of correction the navigation passage of a General Cargo class ship with a deadweight of 10,820 tons between the ports of Brazil and the Caribbean basin was considered, taking into account the constant operation of the ship's four-stroke diesel 5DC-17A of the Daihatsu Diesel company on a mixture of motor fuel and biofuel. It has been experimentally confirmed that this increases the environmental friendliness of the operation of marine diesel engines.

DOI: 10.31653/1819-3293-2023-1-28-52-66

Морській та внутрішній водний транспорт, під час забезпечення перевезення вантажів та пасажирів, споживає велику кількість палива. Найбільш економічним з теплових двигунів, що встановлюються на морських та річкових судах, є дизелі. В порівняння з газовими турбінами та паровими котлами суднові дизелі характеризуються найменшою питомою витратою палива (для сучасних моделей її значення не перевищує 175 ... 180 г/(кВт·год) для двотактних дизелів та 190 ... 195 г/(кВт·год) для чотиритактних). Найбільш розповсюдженим типом судового палива є рідке паливо нафтового походження. Використання газоподібного палива, а також його сумішей з рідким паливом знаходить поширення лише на спеціалізованих судах класів LNG та LPG, на який це паливо транспортується як вантаж. При цьому, як правило, його використання можливо впродовж лише «вантажного» переходу. Після вивантаження судна та під час його повернення в баласті експлуатація дизелів здійснюється на рідкому паливі [1, 2].

Експлуатація судових дизелів супроводжується неминучим забрудненням довкілля випускними газами, до складу яких входять токсичні компоненти – оксиди сірки, азоту та вуглецю. Оксиди сірки та азоту в подальшому конденсуються в повітрі та перетворюються в кислоти, які повертаються на поверхню Світового океану, острівну або материкову частину Землі [3, 4]. Оксиди вуглецю залишаються в атмосфері та руйнують озоновий шар, а також зменшують енергетичну ефективність судна [5, 6]. Це спонукає посилювати вимоги, що висуваються до екологічних показників роботи енергетичних установок суден морського та внутрішнього водного транспорту, а саме:

- розширювати спеціальні зони контролю викидів оксидів сірки з випускними газами – Sulfur Emission Control Areas [7];

- регламентувати рівень концентрації оксидів азоту в випускних газах [8];

- обмежувати викиди оксидів вуглецю [9].

Особо гострою проблема забезпечення екологічності судових двигунів внутрішнього згорання (зокрема по викидам оксидів азоту) стала для чотиритактних дизелів через використання в них важких та середньоважких моторних палив. Скорочений (в порівнянні з двотактними дизелями) час перебігу робочого циклу цих дизелів призводить до окислення азоту в випускному колекторі (в умовах знижених температур). Це зсуває механізм утворення оксидів азоту з швидкого до теплового, що сприяє збільшенню їх загальної кількості в випускних газах. Це викликає необхідність постійного контролю

вмісту оксидів азоту в випускних газах, особливо під час знаходження суден в спеціальних екологічних зонах або в прибережних акваторіях [10].

Викладене є однією із причин використання в судновій енергетиці альтернативних видів палива не нафтового походження, які сприяють зниженню шкідливих складових випускних газів та підвищують екологічність роботи суднових дизелів. Одним з видів альтернативного палива є паливо біологічного походження, яке отримують з рослинних жирів та олій шляхом естерифікації метанолом чи етанолом [11]. Відповідно до Євростандарту EN 14214 «Паливо для двигунів внутрішнього згорання. Метиллові ефіри жирних кислот», подібні палива позначаються як FAME – Fatty Acid Methyl Ester, та рекомендуються для використання в дизелях, що встановлені на автомобільному та залізничному транспорті, а також дизелях електричних станцій. Обмеження поширення біодизельного палива в суднових енергетичних установках пов'язано з відносно невеликим строком його зберігання (що змушує скорочувати обсяги його бункерування та стає підставою неможливості його використання під час тривалих океанських переходів) та відсутністю цього палива в деяких морських портах (які розташовані поза районами його виробництва або зберігання). Ще одним з недоліків біодизельного палива є його зменшена (порівняння з паливом нафтового походження) теплотворна здатність, яка не перевищує 37000 ... 37500 кДж/кг. Це не дозволяє використовувати біодизельне паливо як окреме джерело отримання енергії та викликає необхідність виготовлення паливних сумішей, частину яких (70 ... 90 %) складає нафтове (суднове моторне) паливо, решту – біодизельне. З урахуванням відповідності питомої маси біодизельного та суднового моторного палива, використання подібних сумішей забезпечує поступове впровадження біодизельного палива в суднових енергетичних установках під час експлуатації суднових дизелів. Безумовною перевагою використання сумішей біодизельного та суднового моторного палива є поліпшення екологічних показників роботи суднових дизелів, яке виявляється в суттєвому зниженні концентрації оксидів сірки, азоту та вуглецю в випускних газах [12, 13].

Одним з завдань, що потрібно розв'язувати під час використання біодизельного палива, є визначення його обсягу під час бункерування судна. При цьому потрібно враховувати термін зберігання біопалива, його витрату та можливість поповнення запасів. Конструкція суднових паливних систем не передбачає транспортування та збереження біопалива в танках запасу палива, в відстійних або витратних танках.

Ці ємкості спроектовані та розраховані для суднового моторного палива (дизельного, або важкого). Тому постачання біопалива під час бункерування виконується в бочкотарі об'ємом до 200 літрів. Їх збереження здійснюється на відкритих палубах судна (що неможливо для деяких типів суден) та безпосередньо в машинному відділенні судна (що суттєво зменшує кількість біопалива). Це вимагає постійного поповнення запасів біопалива, при цьому період отримання біопалива (в разі його постійного використання в суднових дизелях) менший за період отримання моторного палива. Важливим фактором під час отримання біопалив є необхідність повернення порожньої бочкотарі після його використання (тобто зменшення запасів біопалива не зменшує об'єм суднових приміщень, які це паливо займає). Під час визначення необхідного обсягу біопалива необхідно також враховувати його оптимальну концентрацію в паливній суміші з нафтовим паливом. Через обмежений обсяг біопалива, отримання та збереження якого можливо на борту судна, паливні суміші, до яких воно входить, використовують в суднових допоміжних дизелях, які (порівнянні з головними, через меншу потужність мають меншу годинну / добову або рейсову витрату палива).

Світовими лідерами з виробництва біопалива є Бразилія (у Південній Америці), США (у Північній Америці), Німеччина в країнах ЄС, Індонезія в Азіатському та Тихоокеанському басейні. Але при цьому не в кожному морському порту є можливість отримання біопалива – з метою його подальшого використання в суднових дизелях. Це призводить до лише періодичного використання біопалива під час забезпечення роботи дизелів та зменшення їх екологічної стійкості.

Метою дослідження є корегування переходу судна класу General Cargo дедвейтом 10820 т між портами Бразилії та Карибського басейну з урахуванням забезпечення постійної роботи суднових допоміжних дизелів 5DC-17A фірми Daihatsu Diesel на суміші моторного палива та біопалива (це, в свою чергу, сприятиме підвищенню екологічності роботи дизелів через зниження емісії оксидів азоту). До основних характеристик дизелів відносяться:

частота обертання колінчатого валу – $n=1000 \text{ хв}^{-1}$;

ефективна потужність на номінальному режимі роботи – $N_{\text{енном}}=490 \text{ кВт}$;

питома ефективна витрата палива в діапазоні експлуатаційних навантажень $(0,6 \dots 0,95)N_{\text{енном}} - 0,194 \dots 0,186 \text{ кг}/(\text{кВт}\cdot\text{год})$;

кількість дизелів в складі суднової допоміжної енергетичної установки – 3.

Принципова схема витратної паливної системи суднових дизелів 5DC-17A фірми Daihatsu Diesel з урахуванням можливості виготовлення та використання паливної суміші до складу якої входить біопаливо та суднове моторне паливо, надана на рис. 1.

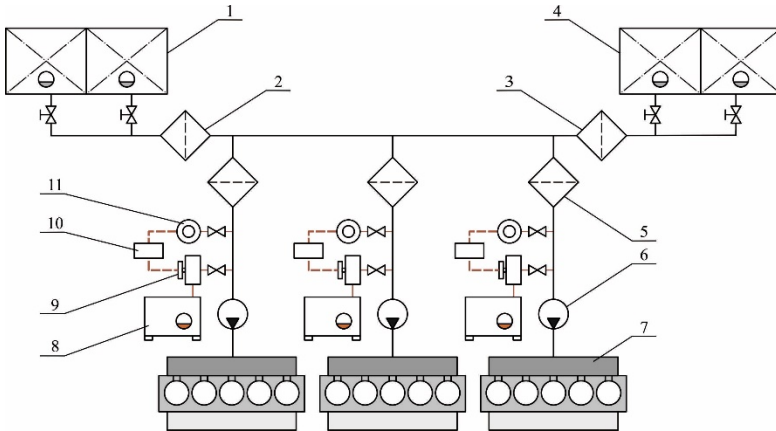


Рис. 1. Принципова схема паливної системи суднових дизелів 5DC-17A фірми Daihatsu Diesel:

- 1 – витратна цистерна дизельного (легкого) паливна DMA10;
 2, 3 – паливний фільтр грубого очищення; 4 – витратна цистерна середньоважкого паливна RMB30; 5 – паливний фільтр тонкого очищення; 6 – паливний насос; 7 – дизель; 8 – цистерна біопалива; 9 – дозатор; 10 – мікроконтролер; 11 – витратомір

Робота паливної системи відбувалась в такий спосіб. Експлуатація дизелів виконувалась на дизельному (легкому) паливі DMA10 (з вмістом сірки 0,08 %) або на середньоважкому паливі RMB30 (з вмістом сірки 0,36 %), характеристики яких забезпечували якісне утворення їх сумішей з біопаливом [14, 15]. 3 витратних цистерн 1 або 3 (в залежності від умов експлуатації дизеля) паливо DMA10 або RMB30 через фільтр грубого очищення 2 або 4 надходило до паливних насосів 6 і далі прямувало до дизелів 7. Додаткове очищення палива забезпечувалась за допомогою фільтра тонкого очищення 5. В магістралі дизелів додатково встановлювалися витратна цистерна біопалива 8, дозатор 9 та витратомір 11 [16, 17]. Як біопаливо використовувалось паливо B99.9 FAME. Необхідна кількість біопалива в паливній суміші забезпечувалась за допомогою мікроконтролера 10 [18].

Перехід здійснювався за маршрутом Сан-Паулу (Бразилія) – Ріо-де-Жанейро (Бразилія) – Салвадор (Бразилія) – Форталеза (Бразилія) – Порт Спейн (Тринідад та Тобаго) – Пуерто Кабело (Венесуела) – Кінгстон (Ямайка) – Гавана (Куба). Зворотній перехід Гавана – Сан-Паулу виконувався в баласті.

Під час переходу загальне навантаження на суднові допоміжні дизелі 5DC-17A фірми Daihatsu Diesel змінювалось в діапазоні 350 ... 750 кВт, але для розрахунків приймалось середньозважене навантаження, яке розраховувалось в такій спосіб:

$$\overline{N}_e^x = 0,65 N_{\text{енном}} n_{\text{дд}}^x, \quad (1)$$

де 0,65 – прийнятий середньозважений коефіцієнт навантаження під час роботи суднових дизелів 5DC-17A фірми Daihatsu Diesel на переході (якій в тому числі враховує втрати під час перетворення теплотворної здатності палива в корисну енергію [19-21]); $n_{\text{дд}}^x$ – кількість допоміжних дизелів, що забезпечували енергетичні потреби судна під час переходу (для ходового режиму роботи приймалось $n_{\text{дд}}^x = 2$).

$$\text{Тоді } \overline{N}_e^x = 0,65 \cdot 490 \cdot 2 = 637 \text{ кВт.}$$

Витрата біопалива під час переходу

$$B_{\text{БП}}^x = \overline{N}_e^x b_e^x C_{\text{БП}} T_i^x, \quad (2)$$

де b_e^x – питома ефективна витрата палива на ходовому режимі, що відповідає обраному навантаженню, кг/(кВт·год); $C_{\text{БП}}$ – концентрація біопалива в паливній суміші з нафтовим паливом; T_i^x – час переходу судна між портами, год.

Під час стоянки з вантажними операціями загальне навантаження на суднові допоміжні дизелі 5DC-17A фірми Daihatsu Diesel змінювалось в діапазоні 850 ... 1200 кВт, але для розрахунків приймалось середньозважене навантаження,

$$\overline{N}_e^c = 0,75 N_{\text{енном}} n_{\text{дд}}^c, \quad (3)$$

де 0,75 – прийнятий середньозважений коефіцієнт навантаження під час роботи суднових дизелів 5DC-17A фірми Daihatsu Diesel на стоянці з вантажними операціями [22, 23]; $n_{\text{дд}}^c$ – кількість допоміжних дизелів, що забезпечували енергетичні потреби судна під час стоянки з вантажними операціями (приймалось $n_{\text{дд}}^c = 3$).

$$\text{Тоді } \overline{N}_e^c = 0,75 \cdot 490 \cdot 3 = 1103 \text{ кВт.}$$

Витрата біопалива під час стоянки з вантажними операціями

$$B_{\text{БП}}^{\text{с}} = \overline{N_e^{\text{с}}} b_e^{\text{с}} C_{\text{БП}} T_i^{\text{с}}, \quad (4)$$

де $b_e^{\text{с}}$ – питома ефективна витрата палива під час стоянки з вантажними операціями, що відповідає обраному навантаженню, кг/(кВт·год); $T_i^{\text{с}}$ – час стоянки з вантажними операціями, год.

Для ходового режиму роботи з урахуванням середньозваженого коефіцієнту навантаження значення питомої ефективної витрати палива приймалось $b_e^{\text{с}} = 0,192$ кг/(кВт·год). Для режиму стоянки з вантажними операціями цей показник приймався $b_e^{\text{с}} = 0,188$ кг/(кВт·год). Визначення цих показників виконувалось експериментально, шляхом вимірювання витрати палива та часу роботи дизелів на обраних режимах [24, 25]. Похибка в вимірюваннях не перевищувала 1,5 %. Вказані значення збігаються з показниками, що визначені в інструкції з експлуатації дизелів.

Сумарна витрата біопалива, яка необхідна для забезпечення роботи суднових допоміжних дизелів 5DC-17A фірми Daihatsu Diesel за час переходу між портами та під час стоянки в одному з портів з вантажними операціями

$$\Sigma B_{\text{БП}} = B_{\text{БП}}^{\text{х}} + B_{\text{БП}}^{\text{с}}. \quad (5)$$

Розрахунок значень витрати біопалива за різних морських переходів та різних умов експлуатації, відповідно до рівнянь (2), (4), (5), а також значення відстані між портами та часу переходу між ними та часу стоянки в портах надані у табл. 1.

Бункерування біопаливом під час переходів (для розглянутого району плавання) можливо лише в наступних портах: Сан-Паулу, Форталеза, Пуерто Кабельо, Гавана. З урахуванням конструкційних особливостей палубного простору, технічних приміщень та машинного відділення судна вони були здатні до розміщення 25-ти 200 літрових бочок з біопаливом. Таким чином, обсяг біопалива під час проведення бункерування не перевищував 5000 літрів. З метою забезпечення роботи суднових допоміжних дизелів 5DC-17A фірми Daihatsu Diesel на паливній суміші (яка складається з судового моторного палива та біопалива) на всьому протязі переходу (в тому числі для переходу Гавана – Сан-Паулу, якій виконувався в баласті) та підтримання екологічних показників їх роботи, схема навігаційного переходу була корегована відповідно до табл. 2.

Таблиця 1

Розрахунок витрати біопалива для різних умов навігаційного переходу

Морський перехід	Відстань між портами, морські милі	Час переходу, год	Середньозважена потужність дизелів під час переходу, кВт	Витрата біопалива під час переходу, кг/год	Час стоянки, год	Середньозважена потужність дизелів під час стоянки, кВт	Витрата біопалива під час стоянки, кг/год	Сумарна витрата біопалива, кг/год
Сан-Паулу – Ріо-де-Жанейро	210	21	637	385	12	1103	373	758
Ріо-де-Жанейро – Салвадор	749	75	637	1376	16	1103	497	1873
Салвадор – Форталеза	798	80	637	1468	9	1103	280	1747
Форталеза – Порт Спейн	1663	166	637	3045	14	1103	435	3481
Порт Спейн – Пуерто Кабельо	392	39	637	715	11	1103	342	1057
Пуерто Кабельо – Кінгстон	690	69	637	1266	8	1103	249	1515
Кінгстон – Гавана	743	74	637	1358	18	1103	560	1917

Дані, що наведені в табл. 2, свідчать про можливість забезпечення необхідних запасів біопалива на всіх ділянках навігаційного переходу. Подальше виготовлення та використання паливних сумішей, до складу яких входить біопаливо, буде сприятиме підвищенню екологічності роботи судових допоміжних дизелів.

Таблиця 2

Корегована схема навігаційного переходу
Сан-Паулу – Гавана – Сан-Паулу

Морський перехід	Витрата біопалива під час переходу, кг/год	Витрата біопалива під час стоянки, кг/год	Характеристика переходу	Сумарна витрата біопалива між проведенням бункрування, кг/год
Сан-Паулу – Ріо-де-Жанейро	385	373	бункрування, перехід, вантажні операції	4379
Ріо-де-Жанейро – Салвадор	1376	497	перехід, вантажні операції	
Салвадор – Форталеза	1468	280	перехід, вантажні операції	
Форталеза – Порт Спейн	3045	–	бункрування, перехід	4102
Порт Спейн – Пуерто Кабельо	715	342	перехід, вантажні операції	
Пуерто Кабельо – Кінгстон	1266	249	бункрування, перехід, вантажні операції	3433
Кінгстон – Гавана	1358	560	перехід, вантажні операції	
Гавана – Кінгстон	1358	–	бункрування, перехід	2624
Кінгстон – Пуерто Кабельо	1266	–	перехід	
Пуерто Кабельо – Порт Спейн	715	435	бункрування, перехід, вантажні операції	4195
Порт Спейн – Форталеза	3045	–	перехід	
Форталеза – Салвадор	1468	–	бункрування, перехід	3229
Салвадор – Ріо-де-Жанейро	1376	–	перехід	
Ріо-де-Жанейро – Сан-Паулу	385	–	перехід	

Під час проведення досліджень на протязі всього навігаційного переходу контролювались основні енергетичні [26], теплові [27] та екологічні [28] показники роботи суднових дизелів 5DC-17A фірми Daihatsu Diesel. Їх значення не перевищувало критичних величин та відповідало вимогам, що висуваються з боку міжнародних класифікаційних товариств та фірм-виробників дизелів та їх допоміжного обладнання. Всі показники контролювались та фіксувались за допомогою програмного забезпечення для управління активами на судах [29]. Поточні та кінцеві показники роботи судна та його енергетичної установки оформлювались як звіти та надавались до відділу технічного менеджменту компанії [30, 31].

Наведені результати дозволяють зробити наступні висновки.

Забезпечення екологічної ефективності суднових чотиритактних дизелів щодо зменшення емісії оксидів азоту з випускними газами можливо шляхом використання паливних сумішей, які складаються з судового моторного палива та палива біологічного походження (біопалива). Поповнення запасів біопалива на теперішній час можливо ще не в кожному з портів, в яких виконується бункерування судна, також через конструкційні особливості судна (палубного простору, технічних приміщень та машинного відділення) під час бункерування на судні можливо розмістити лише обмежений обсяг біопалива. Це є причиною лише періодичного використання біопалива під час забезпечення роботи дизелів та призводить до зменшення їх екологічної стійкості.

В разі, коли навігаційний перехід судна включає порти, які дозволяють отримання біопалива в обсязі, що забезпечує роботу дизелів під час подальшого переходу до інших портів, становиться доцільним його корегування, яке з одного боку забезпечує виконання рейсового завдання, з іншого – надає можливість поповнити запаси біопалива. Останнє сприяє забезпеченню роботи суднових дизелів на паливній суміші, до складу якої входить біопаливо та підвищує їх екологічні показники.

Зроблені розрахунки щодо корегування навігаційного переходу між портами Бразилії та Карибського басейну (у деяких з яких була можливість отримання біопалива) підтверджують можливість поповнення запасів біопалива в обсязі, що забезпечує безперервну роботу суднових дизелів на паливній суміші судового моторного палива та біопалива. Корегування навігаційного переходу найбільш доцільно виконувати шляхом зміни послідовності заходів у порти.

Запропонований варіант корегування навігаційного переходу доцільно використовувати під час експлуатації суден морського та внутрішнього водного транспорту в особливих екологічних районах.

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

1. Заблоцкий Ю.В., Куропятник А.А. Повышение топливной экономичности и экологических параметров работы судовых дизелей при использовании присадок к топливу // *Austria-science*. – 2017. – № 2. – С. 83 – 88.
2. 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.
3. Побережний Р.В., Сагин С.В. Забезпечення екологічних показників дизелів суден річкового та морського транспорту // *Суднові енергетичні установки: наук.-техн. зб.* – Вип. 41. – Одеса: НУ «ОМА». – 2020. – С. 5 – 9.
4. Сагин С.В., Куропятник А.А. Оптимизация режимов работы системы перепуска выпускных газов судовых среднеоборотных дизелей // *Автоматизация судовых технических средств: науч.-техн. сб.* – 2019. – Вип. 25. – Одеса: НУ «ОМА». – С. 79 – 89.
5. Горб С.И. Мониторинг энергоэффективности судов // *Автоматизация судовых технических средств: науч.-техн. сб.* – 2015. – Вип. 21. – Одеса: НУ «ОМА». – С. 48 – 53.
6. Сагин С.В. Реология моторных масел при режимах пуска и реверса судовых малооборотных дизелей // *Universum. Технические науки*. – 2018. – Вип. 3(48). – С. 67 – 71.
7. Sagin S.V., Kuropyatnik A.A. Application of the system of recirculation of exhaust gases for the reduction of the concentration of nitric oxides in the exhaust gases of the ship diesels // *American Scientific Journal*. – 2017. – № 15. – Iss. 2. – P. 67 – 71.
8. Куропятник А.А., Сагин С.В. Управление выпускными газами судовых дизелей для обеспечения экологических показателей // *Автоматизация судовых технических средств: науч.-техн. сборник*. – 2018. – Вип. 24. – Одеса: НУ «ОМА». – С. 72 – 80.
9. Sagin S., Kuropyatnyk O., Sagin A., Tkachenko I., Fomin O., Píšťek V., Kučera P. Ensuring the Environmental Friendliness of Drillships during Their Operation in Special Ecological Regions of Northern Europe // *Journal of Marine Science and Engineering*. – 2022. – Vol. 10(9). – P. 1331.

10. Sagin S. V., Kuropyatnyk O. A., Zablotskiy Yu. V. Gaichenia O. V. Supplying of Marine Diesel Engine Ecological Parameters // *Nase More: International Journal of Maritime Science & Technology*. – 2022. – Vol. 69. – Iss. 1. – P. 53 – 61.

11. Мадей В.В. Використання альтернативного палива в суднових середньооборотних дизелях // *Суднові енергетичні установки: наук.-техн. зб.* – 2021. – Вип. 43. – Одеса: НУ «ОМА». – С. 45 – 53.

12. Сагін С.В., Мадей В.В., Сагін А.С. Робота суднового дизеля на біодизельному паливі // *Автоматизація суднових технічних засобів: наук.-техн. зб.* – 2021. – Вип. 27. – Одеса: НУ «ОМА». – С. 93 – 107.

13. Мадей В.В. Використання в суднових дизелях паливних сумішей до складу яких входить паливо біологічного походження // *Суднові енергетичні установки: наук.-техн. зб.* – 2022. – Вип. 44. – Одеса: НУ «ОМА». – С. 93 – 110.

14. Madey V.V. Usage of biodiesel in marine diesel engines // *Austrian Journal of Technical and Natural Sciences*. – 2021. – № 7-8. – P. 18 – 21.

15. Sagin S., Madey V., Stoliaryk T. Analysis of mechanical energy losses in marine diesels // *Technology Audit and Production Reserves*. – 2021. – № 5 (2 (61)). – P. 26 – 32.

16. Поповский А.Ю., Сагин С.В. Комплексная оценка эксплуатационных характеристик смазочных углеводородных жидкостей // *Автоматизация судовых технических средств: науч.-техн. сб.* – 2014. – Одесса: ОНМА. – Вып. 20. – С. 74 – 83.

17. Поповский А.Ю., Сагин С.В. Оценка эксплуатационных свойств смазочно-охлаждающих жидкостей судовых технических средств // *Автоматизация судовых технических средств: науч.-техн. сб.* – 2016. – Вып. 22. – Одесса: ОНМА. – С. 66 – 74.

18. Горб С.И. Оптимизация главного двигателя на режиме экономического хода судна // *Автоматизация судовых технических средств: науч.-техн. сб.* – 2019. – Вып. 25. – Одесса: НУ «ОМА». – С. 17 – 34.

19. 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.

20. Сагін С.В. Зниження енергетичних втрат в прецизійних парах паливної апаратури суднових дизелів // *Суднові енергетичні установки: наук.-техн. зб.* – 2018. – Вип. 38. – Одеса: НУ «ОМА». – С. 132 – 142.

21. Сагин С.В., Заблоцкий Ю.В. Определение триботехнических характеристик поверхностей по степени упорядоченности пристенных

слоев углеводородных жидкостей // Проблемы техники: наук. -виробн. журнал. – 2011. – № 3. – Одесса: ОНМУ. – С. 78 – 88.

22. 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”, Beijing. – 2019. – Part 1. – P. 139 – 145.

23. Зверьков Д.О., Сагин С.В. Зниження механічних втрат у судових дизелях // Суднові енергетичні установки: наук.-техн. зб. – 2020. – Вип. 40. – Одеса: НУ «ОМА». – С. 20 – 25.

24. Горб С.И. Повышение точности численного моделирования рабочих процессов дизелей // Автоматизация судовых технических средств: науч.-техн. сб. – 2020. – Вып. 26. – Одесса: НУ «ОМА». – С. 3 – 26.

25. Мацкевич Д. В., Сагин С. В., Ханмамедов С. А. Изменение реологических характеристик смазочных материалов в циркуляционной масляной системе в процессе эксплуатации среднеоборотного двигателя // Судовые энергетические установки: науч.-техн. сб. – 2010. – Вып. 25. – Одесса: ОНМА. – С.109 - 118.

26. Поповский Ю. М., Сагин С. В., Ханмамедов С. А., Гребенюк М. Н., Терегеря В. В. Влияние анизотропных жидкостей на работу узлов трения // Вестник машиностроения. – 1996. – № 6. – С. 7 – 11.

27. Gorb S.I., Budurov M.I. Increasing the accuracy of a marine diesel engine operation limit by thermal factor // International Review of Mechanical Engineering. – 2021. – Vol. 15(3). – P. 115 – 121.

28. 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. – 2021. – № 7-8. – P. 36 – 43.

29. Горб С.И., Горб А.С. Программное обеспечение для управления активами на судах // Автоматизация судовых технических средств: науч.-техн. сборник. – 2018. – Вып. 24. – Одесса: ОНМА. – С. 34 – 48.

30. Горб С.И., Каменева А.В. Модель базы данных для модуля идентификации пользователей в системе технического менеджмента судов // Автоматизация судовых технических средств: науч.-техн. сб. – 2015. – Вип. 21. – Одесса: НУ «ОМА». – С. 54 – 59.

31. Горб С.И., Каменева А.В., Запороженченко Н.В. Модернизация структуры упрощённой системы технического менеджмента судов // Автоматизация судовых технических средств: науч.-техн. сб. – 2016. – Вип. 22. – Одесса: ОНМА. – С. 33 – 38.

Анотація – Розглянута можливість корегування навігаційного переходу судна класу General Cargo дедвейтом 10820 т між портами Бразилії та Карибського басейну з урахуванням забезпечення постійної роботи суднових чотиритактних дизелів 5DC-17A фірми Daihatsu Diesel на суміші моторного палива та біопалива. Як моторне використовувалось паливо DMA10 (з вмістом сірки 0,08 %) та паливо RMB30 (з вмістом сірки 0,36 %), характеристики яких забезпечували якісне утворення їх сумішей з біопаливом B99.9 FAME. Виготовлення паливної суміші здійснювалось безпосередньо на судні під час експлуатації суднових дизелів. Експериментально доведено, що забезпечення екологічної ефективності суднових чотиритактних дизелів щодо зменшення емісії оксидів азоту з випускними газами можливо шляхом використання паливних сумішей, які складаються з суднового моторного палива та палива біологічного походження (біопалива). Визначено, що поповнення запасів біопалива на теперішній час можливо ще не в кожному з портів в яких виконується бункерування судна, також через конструкційні особливості судна (палубного простору, технічних приміщень та машинного відділення) під час бункерування на судні можливо розмістити лише обмежений обсяг біопалива. Це є причиною лише періодичного використання біопалива під час забезпечення роботи дизелів та призводить до зменшення їх екологічної стійкості. Встановлено, що в разі, коли навігаційний перехід судна включає порти, які дозволяють отримання біопалива в обсязі, що забезпечує роботу дизелів під час подальшого переходу до інших портів, становиться доцільним його корегування, яке з одного боку забезпечує виконання рейсового завдання, з іншого – надає можливість поповнити запаси біопалива. Останнє сприяє забезпеченню роботи суднових дизелів на паливній суміші, до складу якої входить біопаливо та підвищує їх екологічні показники. Зроблені розрахунки щодо корегування навігаційного переходу між портами Бразилії та Карибського басейну (у деяких з яких була можливість отримання біопалива) підтверджують можливість поповнення запасів біопалива в обсязі, що забезпечує безперервну роботу суднових дизелів на паливній суміші суднового моторного палива та біопалива. Запропонований варіант корегування навігаційного переходу доцільно використовувати під час експлуатації суден морського та внутрішнього водного транспорту в особливих екологічних районах.

Annotation – The possibility of adjusting the navigation passage of a General Cargo class ship with a deadweight of 10,820 tons between the ports of Brazil and the Caribbean basin was considered, taking into account the constant operation of the ship's four-stroke diesel engines 5DC-17A of the

Daihatsu Diesel company on a mixture of motor fuel and biofuel. DMA10 fuel (with a sulfur content of 0.08 %) and RMB30 fuel (with a sulfur content of 0.36 %) were used as motor fuel, the characteristics of which ensured the high-quality formation of their mixtures with B99.9 FAME biofuel. The production of the fuel mixture was carried out directly on the ship during the operation of the ship's diesel engines. It has been experimentally proven that ensuring the environmental efficiency of marine four-stroke diesel engines in terms of reducing the emission of nitrogen oxides with exhaust gases is possible by using fuel mixtures consisting of marine motor fuel and fuel of biological origin (biofuel). It was determined that the replenishment of biofuel reserves is currently not possible in each of the ports where the ship is bunkered, also due to the structural features of the ship (deck space, technical spaces and engine room), during bunkering on the ship it is possible to place only a limited volume of biofuel. This is the reason for the periodic use of biofuel only when ensuring the operation of diesel engines and leads to a decrease in their environmental sustainability. It has been established that in the case when the navigation passage of the ship includes ports that allow obtaining biofuel in the amount that ensures the operation of diesel engines during the further passage to other ports, it becomes expedient to adjust it, which, on the one hand, ensures the use of performance of the flight task, on the other hand, it provides an opportunity to replenish biofuel reserves. The latter contributes to ensuring the operation of marine diesels on a fuel mixture that includes biofuel and improves their environmental performance. Calculations made regarding the adjustment of the navigation transition between the ports of Brazil and the Caribbean basin (some of which had the possibility of receiving biofuel) confirm the possibility of replenishing the reserves of biofuel in the amount that ensures the continuous operation of ship diesels on a fuel mixture of marine motor fuel and biofuel. It is advisable to use the proposed variant of correction of the navigation passage during the operation of sea and inland water transport vessels in special ecological areas.

УДК 629.5

ARTICLE HISTORY

Received 02.03.2023

Accepted 12.03.2023

Сагін Арсеній Сергійович
НУ «Одеська морська академія», Одеса, Україна
arseniysagin@gmail.com

Корегування налаштування паливної апаратури високого тиску під час переведення суднових дизелів на паливо з низьким вмістом сірки

Sagin Arseniy
NU "Odessa Maritime Academy", Odessa, Ukraine
arseniysagin@gmail.com

Correction of high-pressure fuel equipment setting when converting marine diesels to low-sulfur fuel

Резюме – Надані результати щодо корегування налаштування паливних насосів високого тиску судового дизеля 6S60MC-8.2-ТII під час його експлуатації в спеціальних екологічних районах Sulfur Emission Control Areas на паливі з низьким вмістом сірки. Експериментально підтверджено, що шляхом зменшення кута випередження подачі палива досягається зниження динамічних навантажень на деталі кривошипно-шатунного механізму та зменшення пікових температур в циліндрі дизеля. Це виявляється в зменшенні ступеню підвищення тиску під час згоряння та зниженні емісії оксидів азоту.

Abstract – The results are presented on adjusting the setting of the high pressure fuel pumps of the 6S60MC-8.2-TII marine diesel engine during its operation in special environmental areas of Sulfur Emission Control Areas on low-sulfur fuel. It has been experimentally confirmed that by reducing the advance angle of fuel supply, a reduction in dynamic loads on the parts of the crank-connecting mechanism and a reduction in peak temperatures in the diesel cylinder is achieved. This is manifested in a decrease in the degree of pressure increase during combustion and a decrease in the emission of nitrogen oxides.

DOI: 10.31653/1819-3293-2023-1-28-67-78

Експлуатація суднових двигунів внутрішнього згоряння має виконуватися не лише з підтриманням необхідної потужності та виконанням вимог інструкцій з експлуатації, але також із забезпеченням екологічних показників їх роботи. До основних екологічних показників роботи суднових дизелів належать концентрація оксидів сірки SO_x та оксидів азоту NO_x в випускних газах [1, 2]. Значення обох показників регламентується вимогами Додатка VI MARPOL, при цьому обмеження щодо емісії NO_x (яке відповідає рівням Tier I, II або III) залежить від року побудови дизеля та його номінальної частоти обертання, обмеження викидів SO_x визначається вмістом сірки в паливі [3, 4]. З 01.02.2020 на судах морського та внутрішнього водного транспорту заборонено використання морських сортів палива, вміст сірки в яких перевищує 0,5 % за масою [5, 6]. Також визначені спеціальні екологічні райони з обмеження викидів оксидів сірки (Sulfur Emission Control Areas – SECAs), в яких дозволяється використовувати паливо з вмістом сірки не більш ніж 0,1 %. Під час роботи в цих районах або за умовою їх перетинання суднові дизелі (які використовували паливо зі вмістом сірки більш ніж 0,1 %) переводяться на експлуатацію на паливі зі вмістом сірки, що не перевищує 0,1 %. Цей перевід виконується поступово з урахуванням обсягу сірчистого палива в витратній цистерні, вмісту сірки в паливі та експлуатаційної потужності дизеля. Час експлуатації дизеля на паливі з низьким вмістом сірки залежить від швидкісних характеристик судна, гідрометеорологічних умов переходу, часу перебування в зоні SECAs та коливається від кількох годин (при знаходженні судна в екологічних районах Північної Європи) до кількох днів (під час руху в каравані суден внутрішніми водними шляхами Китаю).

Одна з проблем, що виникає під час переведу дизелів на паливо з низьким вмістом сірки, полягає в наступному. Зниження вмісту сірки в паливі сприяє зниженню його густини, в'язкості, температури самозаймання та збільшує теплотворну здатність палива (через пропорційне збільшення вмісту в паливі водню та вуглецю) [7, 8]. За однакових умов процесу впорскування палив, що мають меншу температуру самозаймання та більшу теплотворну здатність, характеризуються більш високою температурою наприкінці згоряння T_z . Це обумовлюється зменшенням кута затримки самозаймання, збільшенням кута випередження початку згоряння та більшою ефективністю процесу згоряння в районі верхньої мертвої точки (ВМТ) [9, 10]. Основні теплофізичні характеристики суднових палив наведені в табл. 1.

Таблиця 1

Основні теплофізичні характеристики суднових палив

Характеристика	RMG500	RMG380	DMA15
Вміст сірки, %	0,50	0,48	0,082
Вміст вуглецю, %	82,1	82,2	83,1
Вміст водню, %	10,3	10,5	10,5
Густина за 15 °С, кг/м ³	993	982	931
В'язкість за 50 °С, мм ² /с	500	380	11,7
Температура спалаху, °С	81	78	73
Температура самозаймання, °С	203	197	112
Теплотворна здатність, кДж/кг	41660	41920	42230

За умовою більш раннього самозаймання палива підвищується кількість палива, що згоряє до ВМТ. Це призводить до збільшення швидкості зростання тиску за кутом повороту колінчатого валу («жорсткості» роботи дизеля) та збільшенню ступеню підвищення тиску під час згоряння $\lambda = p_z / p_c$, де p_z , p_c – максимальний тиск згоряння та тиск наприкінці стиснення, МПа [11, 12]. Останнє найбільш негативне для двохтактних дизелів, що характеризуються підвищеною масою деталей кривошипно-шатунного механізму, тому викликає збільшення ударних навантажень на крейцкопфний та мотильовий підшипники [13, 14].

Температура наприкінці згоряння z визначається через термодинамічне рівняння згоряння за виразом:

$$T_z = \frac{(m_T - 1)\xi_z Q_H + (c_{pc} + R_c(\lambda - 1))T_c}{m_T c_{pz}}, \quad (1)$$

де m_T – коефіцієнт збільшення маси заряду; ξ_z – коефіцієнт використання теплоти наприкінці згоряння; Q_H – нижча теплотворна здатність палива, кДж/кг; c_{pc} , c_{pz} – середні питомі ізобарні теплоємності суміші повітря та залишкових газів, а також продуктів згоряння, кДж/(кг·К); R_c – газова постійна суміші повітря та залишкових газів; λ – ступінь підвищення тиску під час згоряння; T_c – температура наприкінці процесу стиснення, К.

Визначення T_z шляхом вимірювання неможливо через динамічність зміни температури в циліндрі дизеля, тому для оцінки її значень використовують розрахункові моделі [15, 16]. Результати моделювання за виразом (1) для співрозмірних за діаметром циліндра d , але різних за ходом поршню S дизелів MAN-Diesel&Turbo, надано в табл. 2.

Таблиця 2

Результати моделювання

Марка та характеристики дизеля	Нижча теплотворна здатність палива, $Q_{н}$, кДж/кг	Температура наприкінці згорання, T_z , К
K80MC $d=0,8$ м, $S=2,3$ м	41660	1866
	41920	1876
	42230	1887
L80MC $d=0,8$ м, $S=2,592$ м	41660	1822
	41920	1833
	42230	1845
S80MC $d=0,8$ м, $S=3,056$ м	41660	1811
	41920	1825
	42230	1840
G80ME $d=0,8$ м, $S=3,72$ м	41660	1742
	41920	1759
	42230	1776

Незначне на перший погляд підвищення температури T_z під час зміни одного сорту палива на інший характеризується (через інертність теплових процесів) накопичувальним ефектом, що сприяє зростанню теплової напруженості дизеля. До «прихованих» негативних наслідків підвищення температури T_z також відноситься збільшення концентрації оксидів азоту NO_x в випускних газах дизеля, що неминусе виникає відповідно до високотемпературного механізму утворення NO_x Я.В. Зельдовича та теорії утворення швидких NO_x К. Фенімору [17, 18].

Для визначення механізму, за допомогою якого можливо управління процесом згорання палива під час переведення роботи дизеля 6S60MC-8.2-ТІІ MAN-Diesel & Turbo на паливо з низьким вмістом сірки проводився такий експеримент.

Після підготовки паливної системи до експлуатації в зоні SECA (а саме, повного витрачання палива RMG500 зі вмістом сірки 0,5 % та заповнення витратних цистерн паливом DMA15 зі вмістом сірки 0,082 %) було виконано переналаштування паливних насосів високого тиску (ПНВТ) шляхом зміни кутів випередження подачі палива. Для циліндрів № 1 та 6 значення попередніх кутів випередження (на яких виконувалась експлуатація дизеля на паливі RMG500) залишилось незмінним (-6° повороту колінчатого валу – ПКВ). Для циліндрів № 2, 3, 4, 5 встановлювались нові кути

випередження -5,5, -4,5, -4,0, -5,0 °ПКВ відповідно). Під час дослідження для кожного з циліндрів контролювались максимальний тиск згоряння p_z , тиск наприкінці стиснення p_c , середній індикаторний тиск p_i та температура випускних газів $t_{вг}$. За результатами вимірювання p_i визначалося середнє значення індикаторного тиску всіх циліндрах дизеля $p_i^{cp} = (p_i^1 + p_i^2 + \dots + p_i^6) / 6$, де $p_i^1, p_i^2, \dots, p_i^6$ – індикаторний тиск по відповідним циліндрам дизеля, МПа, та відносне відхилення індикаторного тиску за окремими циліндрами від його середнього значення всіх циліндрів $\Delta p_i^n = |p_i^n - p_i^{cp}| \cdot 100\% / p_i^n$, де p_i^n – індикаторний тиск в одному з циліндрів, МПа. Фіксація показників роботи дизеля здійснювалась для навантаження $0,85N_{ном}$, де $N_{ном} = 14280$ кВт – максимальна тривала експлуатаційна потужність. Також в газовипускній магістралі вимірювалась концентрація оксидів азоту в випускних газах. Результати дослідження узагальнені в табл. 3.

Таблиця 3

Результати дослідження

Номер циліндра	Кут випередження подачі палива, °ПКВ	Максимальний тиск згоряння, p_z , МПа	Тиск наприкінці стиснення, p_c , МПа	Ступінь підвищення тиску під час згоряння, λ	Середній індикаторний тиск, p_i , МПа	Відносне відхилення індикаторного тиску, Δp_i , МПа	Температура випускних газів, $t_{вг}$, °С
1	-6,0	14,68	12,56	1,169	1,96	-1,28	374
2	-5,5	14,72	12,68	1,161	1,97	-0,76	377
3	-4,5	14,78	12,81	1,154	2,01	1,24	382
4	-4,0	14,66	12,78	1,147	2,01	1,24	386
5	-5,0	14,71	12,65	1,163	1,99	0,25	383
6	-6,0	14,77	12,58	1,174	1,97	-0,76	375

За результатами табл. 3 побудовані номограми (рис. 1), що відображають зміну показників роботи дизеля за різних умов налаштування ПНВТ. Як найбільш інформативні показники, що характеризують перебіг процесу згоряння та використання теплоти,

були обрані ступінь підвищення тиску під час згоряння λ та температура випускних газів $t_{вг}$. Значення p_i , Δp_i та $t_{вг}$ були віднесені до показників, що характеризують рівномірність розподілення навантаження циліндрів дизеля.

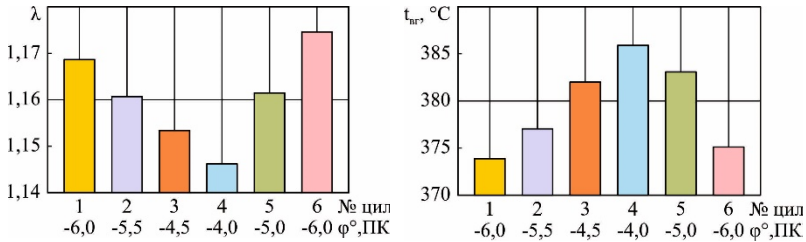


Рис. 1. Зміна ступеню підвищення тиску під час згоряння λ та температура випускних газів $t_{вг}$ для різних кутів випередження подачі палива суднового дизелю 6S60MC-8.2-ТІІ

Неузгодженість показників робочого процесу в циліндрах під час переналаштування ПНВТ на різні для кожного з циліндрів кути випередження подачі палива не перевищувала: $p_z - \pm 0,5\%$; $p_i - \pm 1,3\%$; $p_c - \pm 1,0\%$, $t_{вг} - \pm 7^\circ\text{C}$ [19, 20]. Дозволена розбіжність в значеннях Δp_i гарантувала ефективність перебігу робочого циклу у всіх циліндрах дизеля [21, 22].

Вимірювання концентрації оксидів азоту в випускних газах виконувалося для трьох умов експлуатації дизеля: робота на паливі RMG500, робота на паливі DMA15 з однаковими кутами випередження подачі палива (до переналаштування дизеля), робота на паливі DMA15 з різними кутами випередження подачі палива (після переналаштування дизеля) [23, 24]. При цьому для всіх випадків дизель експлуатувався на навантаженні $0,85N_{ном}$ не менш ніж 2 год. Номограма, що відображає зміну NO_x за цих умов, надана на рис. 2.

Значення концентрації NO_x в випускних газах на всіх режимах роботи не перевищувало максимально можливої величини, яка для дизелів, що відносяться до рівню Tier II відповідно до вимог Додатку VI МАРПОЛ складає $14,4\text{ г}/(\text{кВт}\cdot\text{год})$ [25, 26].

Збільшення концентрації NO_x в випускних газах під час роботи дизеля 6S60MC-8.2-ТІІ з використанням палива DMA15 (з низьким вмістом сірки) свідчить про підвищення пікових температур під час згоряння палива за цих умов. Переналаштування ПНВТ на різні кути випередження та пов'язане з цим зменшення емісії NO_x обумовлюється

затримкою займання палива та зниженням максимальної температури згоряння палива [27, 28].

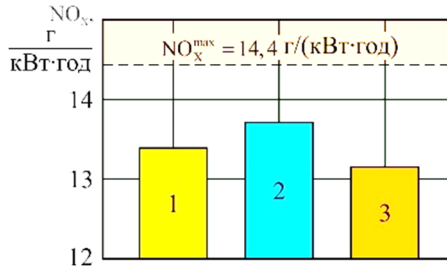


Рис. 2. Концентрація NO_x в випускних газах суднового дизеля 6S60MC-8.2-ТІІ за різних умов експлуатації: 1 – робота на паливі RMG500; 2 – робота на паливі DMA15 з однаковими кутами випередження подачі палива для всіх циліндрів; 3 – робота на паливі DMA15 з різними кутами випередження подачі палива по циліндрах дизеля (відповідно до табл. 3)

Результати досліджень, дозволяють зробити наступні **висновки**.

1. Під час переведення суднових дизелів на паливо з низьким вмістом сірки підвищується інтенсивність його згоряння, що виявляється в зростанні максимальної температури згоряння та підвищенні динамічних навантажень на деталі циліндрової групи та кривошипно-шатунного механізму. Це збільшує концентрацію оксидів азоту в випускних газах дизеля та ступінь підвищення тиску під час згоряння. Перше погіршує екологічність роботи дизеля, друге – сприяє підвищенню ударних навантажень на вкладиші підшипників дизеля.

2. Експериментально встановлено, що шляхом корегування кутів випередження палива можливо забезпечення перебігу процесу згоряння з меншою тепловою ефективністю. Для суднового дизеля 6S60MC-8.2-ТІІ переналаштування ПНВТ призводить до зменшення ступеню підвищення тиску під час згоряння зі значень 1,169 ... 1,174 до значень 1,147 ... 1,161 (в залежності від кутів подачі палива), також за цих умов досягається зменшення емісії оксидів азоту з 13,7 $\text{gNO}_x/(\text{kВт}\cdot\text{год})$ до 13,2 $\text{gNO}_x/(\text{kВт}\cdot\text{год})$.

3. Під час переналаштування ПНВТ необхідно стежити за енергетичними показниками дизеля (насамперед за індикаторним тиском p_i та його неузгодженістю за окремими циліндрами Δp_i) та його тепловою напруженістю (насамперед за температурою випускних газів для кожного з циліндрів $t_{\text{вг}}$). Під час проведення досліджень на дизелі

6S60MC-8.2-ТІІ відхилення цих показників від середнього значення, визначеного во всіх циліндрах, не перевищувало $\pm 1,3\%$ для Δp_i та $\pm 7^\circ$ для $\Delta t_{вг}$.

4. Реалізація контролю показників роботи дизеля під час корегування налаштування його паливної апаратури, а також збереження масивів отриманих даних можливо за допомогою спеціальних програм [29, 30].

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

1. Sagin S.V., Kuropyatnyk O.A., Zablotskiy Yu.V. Gaichenia O.V. Supplying of Marine Diesel Engine Ecological Parameters // Nase More: International Journal of Maritime Science & Technology. – 2022. – Vol. 69. – Iss. 1. – P. 53 – 61.

2. Sagin S., Kuropyatnyk O., Sagin A., Tkachenko I., Fomin O., Píštěk V., Kučera P. Ensuring the Environmental Friendliness of Drillships during Their Operation in Special Ecological Regions of Northern Europe // Journal of Marine Science and Engineering. – 2022. – Vol. 10(9). – P. 1331.

3. Sagin S.V., Kuropyatnik A.A. Application of the system of recirculation of exhaust gases for the reduction of the concentration of nitric oxides in the exhaust gases of the ship diesels // American Scientific Journal. – 2017. – № 15. – Iss. 2. – P. 67 – 71.

4. 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. – 2021. – № 7-8. – P. 36 – 43.

5. Заблоцький Ю.В. Підвищення паливної економічності суднових дизельних установок // Вісник Одеського національного морського університету: зб. наук. праць. – 2020. – № 2(62). – С. 106 – 119.

6. Sagin S.V., Kuropyatnyk O.A., Zablotskiy Yu.V. Gaichenia O.V. Supplying of Marine Diesel Engine Ecological Parameters // Nase More: International Journal of Maritime Science & Technology. – 2022. – Vol. 69. – Iss. 1. – P. 53 – 61.

7. Zablotskiy Yu.V., Sagin A.S. Applying of fuel additives in marine diesel engines // Суднові енергетичні установки: наук.-техн. зб. – 2021. – Вип. 43. – Одеса: НУ «ОМА». – С. 5 – 17.

8. Sagin A.S., Zablotskiy Yu.V. Reliability maintenance of fuel equipment on marine and inland navigation vessels // Austrian Journal of Technical and Natural Sciences. Scientific journal. – 2021. – № 7-8. – P. 14 – 17.

9. Сагін С.В. Зниження енергетичних втрат в прецизійних парах паливної апаратури суднових дизелів // Суднові енергетичні установки: наук.-техн. зб. – 2018. – Вип. 38. – Одеса: НУ «ОМА». – С. 132 – 142.

10. Сагін С.В., Мадей В.В., Сагін А.С. Робота суднового дизеля на біодизельному паливі // Автоматизація суднових технічних засобів: наук.-техн. зб. – 2021. – Вип. 27. – Одеса: НУ «ОМА». – С. 93 – 107.

11. 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.

12. Заблоцький Ю.В., Сагін А.С. Визначення динамічних навантажень під час зміни режимів мащення прецизійних пар паливної апаратури суднових дизелів // Суднові енергетичні установки: наук.-техн. зб. – 2022. – Вип. 44. – Одеса: НУ «ОМА». – С. 121 – 131.

13. Сагин С.В. Реология моторных масел при режимах пуска и реверса судовых малооборотных дизелей // Universum. Технические науки. – 2018. – Вып. 3(48). – С. 67 – 71.

14. Сагин С.В., Заблоцкий Ю.В. Определение триботехнических характеристик поверхностей по степени упорядоченности пристенных слоев углеводородных жидкостей // Проблемы техники: наук. -виробн. журнал. – 2011. – № 3. – Одесса: ОНМУ. – С. 78 – 88.

15. Горб С.И. Оптимизация главного двигателя на режиме экономического хода судна // Автоматизация судовых технических средств: науч.-техн. сб. – 2019. – Вып. 25. – Одесса: НУ «ОМА». – С. 17 – 34.

16. Горб С.И. Повышение точности численного моделирования рабочих процессов дизелей // Автоматизация судовых технических средств: науч.-техн. сб. – 2020. – Вып. 26. – Одесса: НУ «ОМА». – С. 3 – 26.

17. 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.

18. Побережний Р.В., Сагін С.В. Забезпечення екологічних показників дизелів суден річкового та морського транспорту // Суднові енергетичні установки: наук.-техн. зб. – Вип. 41. – Одеса: НУ «ОМА». – 2020. – С. 5 – 9.

19. Заблоцкий Ю.В., Куропятник А.А. Повышение топливной экономичности и экологических параметров работы судовых дизелей при использовании присадок к топливу // Austria-science. – 2017. – № 2. – С. 83 – 88.

20. Gorb S.I., Budurov M.I. Increasing the accuracy of a marine diesel engine operation limit by thermal factor // *International Review of Mechanical Engineering*. – 2021. – Vol. 15(3). – P. 115 – 121.

21. Кривий М.О., Сагін С.В. Визначення впливу властивостей моторних мастил на розподіл тиску в парах ковзання суднових дизелів // *Суднові енергетичні установки: наук.-техн. зб.* – 2021. – Вип. 43. – Одеса: НУ «ОМА». – С. 18 – 24.

22. Сагін С.В. Определение диапазона стратификации вязкости смазочного материала в трибологических системах судовых дизелей // *Вісник Одеського національного морського університету: зб. наук. праць.* – 2019. – Вип. 1(58). – С. 89 – 100.

23. Sagin S., Madey V., Sagin A., Stoliaryk T., Fomin O., Kuřcera P. Ensuring Reliable and Safe Operation of Trunk Diesel Engines of Marine Transport Vessels // *Journal of Marine Science and Engineering*. – 2022. – Vol. 10(10). – P. 1373.

24. 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”, Beijing.* – 2019. – Part 1. – P. 139 – 145.

25. Sagin S., Madey V., Stoliaryk T. Analysis of mechanical energy losses in marine diesels // *Technology Audit and Production Reserves.* – 2021. – № 5 (2 (61)). – P. 26 – 32.

26. Сагін С.В., Кривий М.О. Визначення розподілу тиску в шарі неньютонівських мастил у суднових енергетичних установках // *Вісник Одеського національного морського університету: зб. наук. праць.* – 2020. – № 2(62). – С. 160 – 170.

27. Куропятник А.А., Сагін С.В. Управление выпускными газами судовых дизелей для обеспечения экологических показателей // *Автоматизация судовых технических средств: науч.-техн. сборник.* – 2018. – Вып. 24. – Одесса: НУ «ОМА». – С. 72 – 80.

28. Сагін С.В., Кривий М.О. Розрахунок контактної тиску та зони контакту в парах ковзання судових дизелів // *Автоматизація суднових технічних засобів: наук.-техн. зб.* – 2021. – Вип. 27. – Одеса: НУ «ОМА». – С. 84 – 92.

29. Горб С.И., Горб А.С. Программное обеспечение для управления активами на судах // *Автоматизация судовых технических средств: науч.-техн. сборник.* – 2018. – Вып. 24. – Одесса: ОНМА. – С. 34 – 48.

30. Горб С.И., Каменева А.В., Запороженко Н.В. Модернизация структуры упрощённой системы технического менеджмента судов // *Автоматизация судовых технических средств: науч.-техн. сб.* – 2016. – Вып. 22. – Одесса: ОНМА. – С. 33 – 38.

Анотація – Надані результати щодо корегування налаштування паливних насосів високого тиску суднового дизеля 6S60MC-8.2-III MAN-Diesel & Turbo під час його експлуатації в спеціальних екологічних районах Sulfur Emission Control Areas на паливі з низьким вмістом сірки. Експерименти здійснювалися з використанням суднових моторних палив RMG500 (вміст сірки в якому складає 0,5 % за масою) та DMA15 (зі вмістом сірки 0,082 % за масою). Експлуатація дизелю на паливі DMA15 виконувалась під час знаходження судна в Sulfur Emission Control Areas, на паливі RMG500 – під час знаходження поза Sulfur Emission Control Areas. Шляхом математичного моделювання встановлено, що під час переведення суднових дизелів на паливо з низьким вмістом сірки підвищується інтенсивність його згоряння, що виявляється в зростанні максимальної температури згоряння та підвищенні динамічних навантажень на деталі циліндрової групи та кривошипно-шатунного механізму. Підтвердження цього виявилось в збільшенні концентрації оксидів азоту NO_x в випускних газах під час роботи дизеля 6S60MC-8.2-III з використанням палива DMA15. Експериментально встановлено, що шляхом корегування кутів випередження палива можливо забезпечення перебігу процесу згоряння з меншою тепловою ефективністю. Для суднового дизелю 6S60MC-8.2-III переналаштування паливних насосів високого тиску призводить до зменшення ступеню підвищення тиску під час згоряння зі значень 1,169 ... 1,174 до значень 1,147 ... 1,161 (в залежності від кутів подачі палива). Також за цих умов досягається зменшення емісії оксидів азоту з 13,7 $гNO_x/(кВт \cdot год)$ до 13,2 $гNO_x/(кВт \cdot год)$, що обумовлюється затримкою займання палива та зниженням максимальної температури згоряння палива. Під час переналаштування паливних насосів високого тиску необхідно стежити за енергетичними показниками дизеля (насамперед за індикаторним тиском p_i та його неузгодженістю за окремими циліндрами Δp_i) та його тепловою напруженістю (насамперед за температурою випускних газів для кожного з циліндрів $t_{вг}$). Під час проведення досліджень на дизелі 6S60MC-8.2-III відхилення цих показників від середнього значення, визначеного во всіх циліндрах, не перевищувало $\pm 1,3$ % для Δp_i та ± 7 ° для $\Delta t_{вг}$.

Annotation – The results are presented on the adjustment of the high pressure fuel pump settings of the 6S60MC-8.2-III MAN-Diesel & Turbo marine diesel engine during its operation in special environmental areas of Sulfur Emission Control Areas on low-sulfur fuel. The experiments were

performed using marine motor fuels RMG500 (with a sulfur content of 0.5 % by mass) and DMA15 (with a sulfur content of 0.082 % by mass). The diesel engine was operated on DMA15 fuel while the ship was in Sulfur Emission Control Areas, on RMG500 fuel – while outside Sulfur Emission Control Areas. By means of mathematical modeling, it was established that during the conversion of marine diesel engines to fuel with a low sulfur content, the intensity of its combustion increases, which is manifested in an increase in the maximum combustion temperature and an increase in dynamic loads on the parts of the cylinder group and the crank-connecting mechanism. This was confirmed by an increase in the concentration of nitrogen oxides NO_x in the exhaust gases during the operation of the 6S60MC-8.2-TII diesel engine using DMA15 fuel. It was experimentally established that by adjusting the angles of advance of the fuel, it is possible to ensure the course of the combustion process with lower thermal efficiency. For the marine diesel engine 6S60MC-8.2-TII, the reconfiguration of the high-pressure fuel pumps leads to a decrease in the degree of pressure increase during combustion from values 1.169 ... 1.174 to values 1.147 ... 1.161 (depending on the fuel supply angles). Also, under these conditions, a reduction in the emission of nitrogen oxides from 13.7 $gNO_x/(kW \cdot h)$ to 13.2 $gNO_x/(kW \cdot h)$ is achieved, which is due to the delay in fuel ignition and the reduction of the maximum fuel combustion temperature. During the reconfiguration of high-pressure fuel pumps, it is necessary to monitor the energy indicators of the diesel engine (primarily the indicator pressure p_i and its inconsistency for individual cylinders Δp_i) and its thermal intensity (primarily the temperature of the exhaust gases for each of the cylinders t_g). During research on the 6S60MC-8.2-TII diesel, the deviation of these indicators from the average value determined for all cylinders did not exceed ± 1.3 % for Δp_i and ± 7 ° for Δt_g .

УДК 681.518.5:681.586.5

ARTICLE HISTORY

Received 09.03.2023

Accepted 17.03.2023

Сандлер Альберт Кирилович
НУ "Одеська морська академія", Одеса, Україна
sa@onma.edu.ua

Застосування альтернативних скломатеріалів для датчиків деформації та вібрації елементів пропульсивного комплексу

Sandler Albert
NU "Odessa Maritime Academy", Odessa, Ukraine
sa@onma.edu.ua

Application of alternative glass materials for for strain and vibration sensors of elements of the propulsion complex

Резюме – Огрунтовано застосування альтернативних видів скломатеріалів для створення волоконно-оптичних датчиків вібрації та деформації для здійснення діагностування елементів пропульсивного комплексу. Показано, що найбільш доцільним є застосування штучного сапфіру для виготовлення чутливих елементів датчиків. Застосування чутливих елементів фулеренового скла не надає суттєвих переваг аналогічними сапфіровими та вимагає більш ретельного захисту.

Технологічні особливості виробництва та вартість штучного діаманту виправдовує його застосування лише у виключних випадках.

Abstract – The paper substantiates the use of alternative types of glass materials for the creation of fiber-optic vibration and strain sensors for diagnosing elements of the propulsion complex. It is shown that the most appropriate is the use of artificial sapphire for the manufacture of sensitive sensor elements. The use of fullerene glass sensing elements does not provide significant advantages over similar sapphire elements and requires more careful protection. The technological features of production and the cost of artificial diamond justify its use only in exceptional cases.

DOI: 10.31653/1819-3293-2023-1-28-79-89

Пульсуючі зусилля гребного гвинта, індуковані нерівномірним і нестационарним потоком, передаються усім елементам пропульсивного комплексу. Як наслідок, виникають адитивні вібрації в підшипникових опорах лінії вала. Це приводить до істотної проблеми зниження надійності пропульсивного комплексу. Крім того, елементи лінії вала діють як фільтр нижніх частот, що підсилює реакції вібрації при її резонансах.

Реалізація заходів щодо забезпечення працездатності суднових пропульсивних комплексів на підґрунті подальшого підвищення надійності й резервування сполучена з суттєвими фінансовими витратами та не завжди гарантує отримання ефективних технічних рішень.

У цих умовах технічне діагностування стану положення осей і стабілізації коливань валів усього пропульсивного комплексу є одним з пріоритетних завдань при формуванні комплексного підходу до підвищення експлуатаційної надійності експлуатації суден широкого спектру призначення.

Рішення проблеми якісного підвищення ефективності моніторингу стану положення валів пропульсивного комплексу, протягом усього життєвого циклу судна, вимагає впровадження концепції застосування новітніх, більш ефективних та економічно доцільних, автоматизованих засобів технічного діагностування та прогнозування. Аналіз еволюції сучасних методів технічної експлуатації підтверджує, що саме використання надійних, верифікованих, інваріантних до експлуатаційних збурень діагностичних засобів, в змозі забезпечити високу експлуатаційну ефективність та надійність функціонування морських транспортних засобів [1 – 3].

Більшість досліджень процесів виникнення й контролю вібрацій комплексу лінії вала зосереджені на вібраційних характеристиках уздовж поздовжнього напрямку. У ряді досліджень [2] визначено, що величина механічних коливань гребного гвинта в поперечному напрямку може дорівнювати величині тяги. Найбільшою мірою ця залежність проявляється на маневровому режимі, коли має місце перекладка керма на значні кути. Лінія вала має кілька підшипникових опор, які передають енергію вібрації на підставу підшипника, що приводить до вібрацій і змін геометрії конструкції корпусу (рис. 1).

Дисбаланс внаслідок порушення центрування й деформацій валів, обумовлених порушеннями геометрії суднового валопровода, приводить до циклічних збурювань у всій роторній системі. Виникають зміни параметрів траєкторій рухливої рівноваги осей валів. Зміни спостерігаються як у просторі зазорів, які примикають до ділянок

додатка вібраційних навантажень опорних вузлів, та і у суміжних з ними, які у вихідному стані були динамічно більш стабільні (рис. 2) [4].



Рис. 1. Результати моделювання зміни геометрії лінії валу з застосуванням методу кінцевих елементів

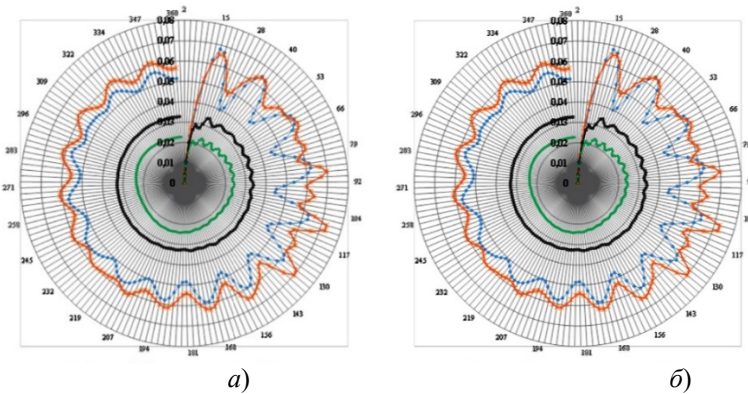


Рис. 2. Кругові діаграми віброзсувів осей за траєкторіях рухливої рівноваги в опорах лінії валопроводу за умови обертання на номінальній частоті, мм: *a)* – специфікаційні умови роботи валопроводу; *б)* – дисбаланс гребного валу

Для вирішення задачі ефективного контролю вібраційних процесів у елементах лінії валу висунута гіпотеза, що ґрунтується на припущенні що найбільш доцільним є сумісний контроль механічних

коливань та деформацій лінії валу у точках розташування підшипникових опор.

Однак, засоби і пристрої діагностики технічного стану пропульсивного комплексу функціонують в умовах концентрованого впливу потужних енергетичних полів, що створюються компактно розташованим судновим силовим встаткуванням. Аналіз відомих рішень доводить, що для ефективного моніторингу технічного стану вкрай необхідні нові засоби діагностування та прогнозування технічного стану їх підшипникових вузлів, а саме – нечутливі до більшості експлуатаційних дестабілізуючих факторів (ДФ) волоконно-оптичні датчики (ВОД) [5].

Метою дослідження є розробка технології вимірювання механічного навантаження та відповідних деформацій підшипникових опор лінії валу за допомогою ВОД. Впровадження результатів дослідження дасть можливість суттєво підвищити вірогідність оцінювання технічного стану елементів суднового пропульсивного комплексу.

Для досягнення мети треба визначити схематичне рішення ВОД, який є завадостійким до впливу ДФ при здійсненні постійного та довготривалого моніторингу технічного стану елементів суднового пропульсивного комплексу.

Завдання суттєвого підвищення рівня стабільності характеристик та достовірності результатів вимірювань ВОД вирішено на підґрунті синтезу вимірювального засобу. Засіб запроєктовано на основі оптимізації сполучення конструктивних параметрів і комбінації оптичних матеріалів. Критерієм оптимізації є ступень інваріантності до впливу зовнішніх експлуатаційних та ДФ.

На основі аналізу потенційних можливостей ВОД амплітудної модуляції й методів корекції погрішностей волоконних вимірювальних перетворювачів застосовано наступний алгоритм синтезу структурної моделі (рис. 3) [6]. Модель складена відповідно до методології структурного синтезу систем як безліч завдань розвитку ВОД:

$$Task^3 = \{Task_i^3\}, i = 1, 2, 3, 4, 5,$$

де $Task_1^3$ – облік вимог до функціональної структури ВОД; $Task_2^3$ – вибір фізичних явищ, які ініціюють зміну інтенсивності випромінювання; $Task_3^3$ – вибір чутливого елемента; $Task_4^3$ – облік загальних вимог до структури ВОД; $Task_5^3$ – побудова структурної моделі ВОД квазілінійного типу [1].

Алгоритм моделювання базується на забезпеченні параметрів ВОД для реалізації заданого діапазону вимірювання з високою чутливістю.

За основну модель такого ВОД прийнята модель маятникового акселерометра.

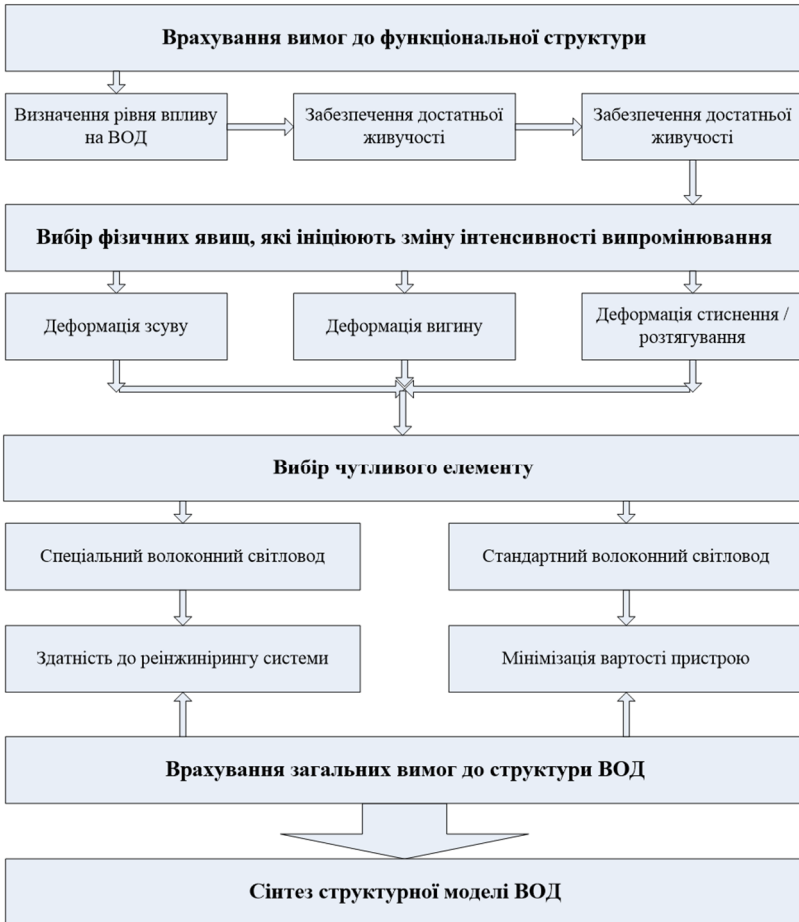


Рис. 3. Алгоритм синтезу ВОД вібрації та деформації

ВОД для контролю технічного стану елементів пропульсивного комплексу повинен забезпечувати здійснення неруйнуючого контролю високочастотної вібрації у смузі частот до 20 кГц. Визначено, що у ВОД для контролю високочастотних коливальних процесів, повинна бути як можна більш висока резонансна частота, а пружний чутливий

елемент (ЧЕ) повинен мати значну жорсткість. Для забезпечення високого значення власної частоти ЧЕ звичайно виконують збільшеного діаметру та як можливо найменшої довжини. Окрім обмежень, що накладаються припустимою механічною напругою, на ЧЕ ВОД також накладаються певні обмеження, пов'язані з особливостями поширення випромінювання у світловодних структурах. Традиційний матеріал волоконної техніки кварцове скло уже не задовольняє комплексу вимог до ВОД вібрації та деформації, що експлуатуються у суднових умовах.

Зважаючи на існуючі обмеження, досліджена потенціна можливість застосування альтернативних видів скломатеріалів для створення ЧЕ. Загальною вимогою до розглянутих оптичних матеріалів, що відрізняються за рядом оптичних і механічних властивостей, є забезпечення експлуатації в екстремальних умовах і підвищеною довговічністю. У якості можливого матеріалу для створення пружного ЧЕ розглянуті такі оптичні матеріали як: штучний діамант, штучний сапфір та скло на основі фуллеренів. Орієнтовні конструктивні та фізико-механічні параметри елементів коливальної системи обрані такими, що дорівнюють аналогічним параметрам вимірювальних перетворювачів відомих типів.

Для оцінки частотних властивостей ВОД маятникової схеми розглядався як ідеалізована коливальна ланка, з одним ступнем свободи сейсмічної маси, яка докладно розглянута в [1].

Аналіз залежності частоти механічної системи ВОД від типу матеріалу чутливого пружного елемента (рис. 3) показав наступне.

Матеріалом, що в змозі забезпечити необхідні характеристики ВОД при мінімальних розмірах ЧЕ, є скло на основі штучного діаманта. Але впровадження цього матеріала суттєво обмежується вартістю та технологічними особливостями виробництва [7].

При впливі зовнішнього світла та повітря властивості фуллерену кардинально змінюються – скломатеріал починає хімічно взаємодіяти з абсорбованим киснем і окиснюватися. Крім впливу світла, утворення хімічних зв'язків між фуллереном і киснем сприяє термічний вплив на фуллерен на повітрі. У випадку створення пристроїв на основі суміші фуллерена й іншого підданого впливу кисню органічної речовини, буде відбуватися значна зміна властивостей усього пристрою у зв'язку з неоднаковою зміною властивостей фуллерена й цієї речовини під дією кисню. Іншою важливою особливістю фуллерена є його схильність до полімеризації й олигомеризації під дією тиску. При цьому в основному відбувається димеризація й лінійна полімеризація залежно від ступеня впливу [8 –

10]. Збереження характеристик ЧЕ з фуллерену потребує наявності захисної оболонки з наноматеріалів [11]. Але захисна оболонка може викликати спотворення чутливості ВОД, особливо при моніторингу високочастотної вібрації.

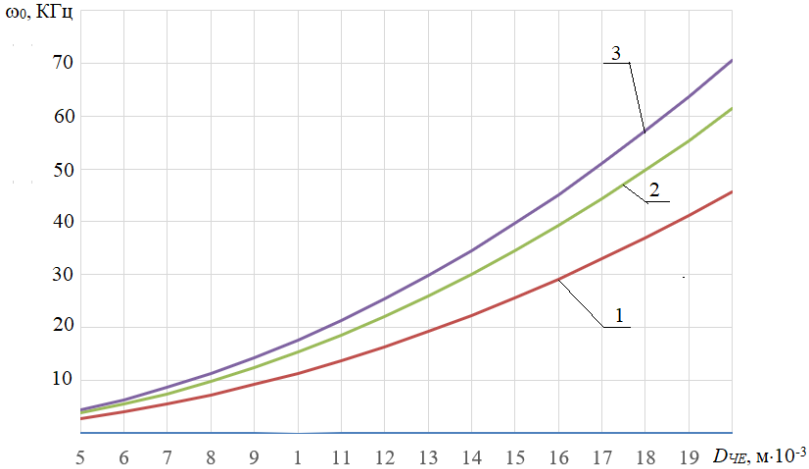


Рис. 3. Залежність власної частоти механічної системи ВОД від типу матеріалу чутливого пружного елемента при різних діаметрах чутливого елемента: 1 – штучний сапфір; 2 – фуллерен; 3 – штучний діамант

У якості матеріалу, що забезпечує необхідні механічні характеристики коливальної системи для контролю високочастотної вібрації при знаходженні у припустимому діапазоні геометричних розмірів, найбільш раціонально використовувати стекла на основі штучного сапфіру. Сапфіровий ЧЕ, який практично не має механічного гістерезису дозволить підвищити чутливість, стабільність. Для досягнення прийнятних параметрів механічної коливальної системи діаметр, ЧЕ, виконаного із сапфірового скла, повинен перебувати в діапазоні 0,0135 ... 0,0145 м [1, 12].

Створення ВОД, на оснві скла зі штучного сапфіру, дозволить отримати засіб вимірювання, який є інваріантним до неконтрольованих впливів дестабілізуючих факторів та має достатню чутливість до контрольованих параметрів. Застосування такого засібу сприятиме

організації постійного та довготривалого контролю технічного стану елементів пропульсивного комплексу.

Запропонований засіб має певні обмеження області свого застосування. В першу чергу до таких обмежень відносяться рівні механічного впливу. Тобто інклінометр може забезпечити отримання вирогідної інформації в умовах коли не відбувається деструкція його елементів під впливом ДФ. Враховуючи особливості компоновки ВОД можна зазначити, що найбільш вразливою є волоконно-оптичний кабель зв'язку.

З оглядом на можливості, обмеження та недоліки, розвиток дослідження має полягати у:

подальшому удосконаленні моделі ВОД, яка дозволить враховувати більше чинників, що впливають на можливість здійснювати безперервний моніторинг елементів суднових пропульсивних комплексів протягом тривалих термінів часу;

пошуках шляхів підвищення фізико-механічних властивостей матеріалів вимірювального засобу;

оптимізації параметрів всіх елементів ВОД за критеріями довготривалої надійності та швидкодії.

Висновки. У відповідності до сформульованої задачі було визначено схемотехнічне рішення ВОД, який задовольняє в першу чергу критеріям завадостійкості до впливу експлуатаційних ДФ при здійсненні постійного та довготривалого діагностування та прогнозування технічного стану елементів суднових пропульсивних комплексів.

На відміну від багатьох відомих, запропонований ВОД за рахунок більшої роздільної здатності дозволив підвищити точність вимірювання з одного боку, а за рахунок конструктивним характеристикам зменшити залежність від експлуатаційних та ДФ. Експлуатаційні показники датчика було експериментально підтверджено та охарактеризовано з точки зору амплітудно-частотної характеристики, чутливості та залежності від параметрів навколишнього середовища. Крім того, були проведені експериментальні випробування в діапазоні відносної вологості 20 ... 60 % для подальшої перевірки ефективності комбінації запропонованого засобу з аналогічними. Відхилення величини оптичної потужності за межами заданого статичного тиску незначне та знаходиться в межах статистичної похибки. Такого результату вдалося досягнути за рахунок того, що запропонований ВОД мав лінійну реакцію на статичний тиск і високу роздільну здатність на динамічний тиск.

ЛІТЕРАТУРА
REFERENCES

1. Сандлер, А. К. Метод підвищення ефективності діагностування технічного стану суднових газотурбінних установок на основі волоконно-оптичних технологій: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.22.20 / К.: Київський університет інфраструктури та технологій, 2021. – 20 с.
2. Ningyuan Duan, Chuang Wu, Yuhong Huang, Zhenguo Zhang, Hongxing Hua. Lateral vibration analysis and active control of the propeller-shafting system using a scaled experimental model// Ocean Engineering. – 2023. – Vol. 267. – P. 113285. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.113285>.
3. Сандлер, А. К., Логишев, И. В., Сандлер, А. А. Инвариантный волоконный акселерометр // Энергетика судна: эксплуатация та ремонт: матеріали науково-технічної конференції. – Одеса: ОНМА. – 2011. – С. 277 – 279.
4. Сапига, В. В., Кирюхин, А. Л., Черпита, П. В. Совершенствование методов анализа динамики судовых валопроводов // Водный транспорт. – 2014. – № 1. – С. 52 – 61. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vodt_2014_1_12.
5. Сандлер, А. К., Будашко, В. В. Волоконно-оптичний інклінометр для діагностування елементів суднового пропульсивного комплексу // XI наукова конференція "Наукові підсумки 2022 року", 20.12.2022: матеріали конференції. – Харків: Технологічний центр. – 2022. – С. 43 – 44. https://entc.com.ua/download/Збірник%20тез_11_Наукової%20конференції_НАУКОВІ%20ПІДСУМКИ%202022%20РОКУ_.pdf.
6. Бабій, Ю. О. Модель синтезу функціональної структури волоконно-оптичного засобу охорони підвищеної заводстійкості та живучості / Ю. О. Бабій // Збірник наукових праць Житомирського військового інституту імені С. П. Корольова. – 2017. – Вип. 14. – С. 55 – 61.
7. Чуркин, В. Д. Неустойчивость алмаза при экстремальных условиях и фазовая диаграмма углерода: дис. ... канд. физ.-мат. наук: 01.04.07 / М.: Моск. физ.-тех. инст., 2022. – 32 с.
8. Квашнина, Ю.А., Квашнин, Д.Г., Квашнин, А.Г., Сорокин, П.Б. Новые аллотропные формы углерода на основе фуллеренов C_{60} и C_{20} с особыми механическими характеристиками // Письма в ЖЭТФ. – 2017. – Т. 105. – вып. 7. – С. 411 – 418. DOI: 10.7868/S0370274X17070013.
9. Вуль, А. Я. Фуллерены как материал электронной техники //Материалы электронной техники. 1999. – №7. – С. 4 – 7.

10. Зиминов, В. М. Оптические и электрофизические свойства объемных гетеропереходов на основе фуллерена и органических либо неорганических доноров: автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук: 01.04.10 / С-Пб.: Санкт-Петербургский гос. политех универ., 2014. – 35 с.

11. Sandler, A., Budashko, V. Improving tools for diagnosing technical condition of ship electric power installations // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2022. – № 5 (119). – P. 25 – 33. DOI: 10.15587/1729-4061.2022.266267.

12. Сандлер, А. К. Чувствительный элемент волоконно-оптического акселерометра на основе сапфирового стекла // IX міжнародна науково-методична конференція "Суднова електроінженерія, електроніка і автоматика", 05-06 листопада 2019 р.: матеріали конференції. – Одеса: НУ "ОМА". – 2019. – С. 27 – 33. dx.doi.org/10.31653/2706-7874.

Анотація. Ефективний контроль вібраційних характеристик елементів лінії гребного вала має вирішальне значення для підтримки рівня надійності всього пропульсивного комплексу. Реалізація заходів щодо забезпечення працездатності суднових пропульсивних комплексів на підґрунті подальшого підвищення надійності й резервування сполучена з суттєвими фінансовими витратами та не завжди гарантує отримання ефективних технічних рішень. Рішення проблеми якісного підвищення ефективності моніторингу стану положення валів пропульсивного комплексу, протягом усього життєвого циклу судна, вимагає впровадження концепції застосування новітніх, більш ефективних та економічно доцільних, автоматизованих засобів технічного діагностування та прогнозування. Для вирішення задачі ефективного контролю вібраційних процесів у елементах лінії валу висунута гіпотеза, що ґрунтується на припущенні, що найбільш доцільним є сумісний контроль механічних коливань та деформацій лінії валу у точках розташування підшипникових опор. Метою дослідження є розробка технології вимірювання механічного навантаження та відповідних деформацій підшипникових опор лінії валу за допомогою волоконно-оптичних датчиків. Впровадження результатів дослідження дасть можливість суттєво підвищити вірогідність оцінювання технічного стану елементів суднового пропульсивного комплексу. Для досягнення мети визначено схематичне рішення та відповідні матеріали датчику, який є завадостійким до впливу дестабілізуючих факторів при здійсненні постійного та довготривалого моніторингу технічного стану елементів суднового пропульсивного комплексу. У якості матеріалу,

що забезпечує необхідні механічні характеристики коливальної системи для контролю високочастотної вібрації при знаходженні у припустимому діапазоні геометричних розмірів, найбільше раціонально використовувати стекла на основі штучного сапфіру.

Abstract. Effective control of the vibration characteristics of the propeller shaft line elements is crucial for maintaining the reliability of the entire propulsion system. Implementation of measures to ensure the operability of ship propulsion systems on the basis of further improvement of reliability and redundancy is associated with significant financial costs and does not always guarantee the receipt of effective technical solutions. The solution to the problem of qualitative improvement of the efficiency of monitoring the position of the shafts of the propulsion complex throughout the entire life cycle of the ship requires the introduction of the concept of using the latest, more efficient and economically feasible automated means of technical diagnostics and forecasting. To solve the problem of effective control of vibration processes in the elements of the shaft line, a hypothesis is put forward based on the assumption that the most appropriate is the joint control of mechanical vibrations and deformations of the shaft line at the points of location of bearing supports. The aim of the study is to develop a technology for measuring the mechanical load and corresponding deformations of the bearing supports of the shaft line using fiber-optic sensors. The implementation of the research results will significantly increase the reliability of assessing the technical condition of the elements of the ship's propulsion system. To achieve this goal, we have determined the circuitry and appropriate materials of the sensor, which is immune to the effects of destabilizing factors during continuous and long-term monitoring of the technical condition of the elements of the ship's propulsion complex. It is most rational to use glasses based on artificial sapphire as a material that provides the necessary mechanical characteristics of the oscillating system to control high-frequency vibration when it is within the permissible range of geometric dimensions.

УДК 629.5

ARTICLE HISTORY

Received 20.02.2023

Accepted 27.02.2023

Столярик Тимур Олександрович
НУ "Одеська морська академія", Одеса, Україна
tymir@gmail.com

Забезпечення режимів мащення суднових чотиритактних дизелів

Stoliaryk Tymur
National University "Odessa Maritime Academy", Odessa, Ukraine
tymir@gmail.com

Ensuring the lubrication regimes of four-stroke marine diesel engines

Резюме – Наведені результати досліджень, щодо забезпечення режимів мащення суднових чотиритактних дизелів. Випробування виконувались на дизелях 6L23/30 MAN-Diesel&Turbo, які в кількості трьох одиниць входили до складу допоміжної енергетичної установки судна класу Bulk Carrier дедвейтом 37620 т. Умови роботи моторного мастила, що використовувалось в циркуляційній системі мащення двох дизелів змінювались шляхом нанесення на поверхні вкладишів підшипників органічних покриттів та додавання до обсягу мастила поверхнево-активної речовини. Експериментально доведено, що при цьому підвищується енергетичні показники роботи дизеля та знижується швидкість окислення мастила.

Abstract – The results of research on ensuring the lubrication regimes of marine four-stroke diesel engines are presented. The tests were performed on 6L23/30 MAN-Diesel&Turbo diesel engines, which in the amount of three units were part of the auxiliary power plant of the Bulk Carrier class vessel with a deadweight of 37,620 tons. The operating conditions of the engine lubricant used in the circulating lubrication system of two diesel engines were changed by applying organic coatings to the surface of the bearing liners and adding a surface-active substance to the volume of the lubricant. It has been experimentally proven that this increases the energy performance of the diesel engine and decreases the rate of oxidation of the motor oil.

DOI: 10.31653/1819-3293-2023-1-28-90-105

Світові дизелебудівні концерни (MaK-Caterpillar, MAN-Diesel&Turbo, Mitsubishi Heavy Industries, Wartsila-Sulzer та ін.) та компанії (Cummins, Daihatsu, Hyundai, Matsui, Yanmar та ін), виробляють та постачають на судна велику кількість двигунів, що працюють за двотактним або чотиритактним циклом. Робочий цикл в циліндрі дизелів забезпечується завдяки подачі палива та повітря та відведення випускних газів [1, 2]. Теплові режими в деталях дизеля підтримуються за допомогою прісної та забортної води, а також мастила, яке одночасно виконує дві функції – охолодження та мащення [3, 4].

Пари тертя суднових дизелів (за винятком паливної апаратури високого тиску) проєктуються за умовою забезпечення гідродинамічного режиму мащення. При цьому змінні навантаження, що діють на шар мастила під час поступального руху поршня, хитливого руху шатуна та обертового руху колінчастого валу, зменшують зазор в відповідних парах тертя, що викликає короткочасні, тривали, а іноді постійні режими граничного тертя [5, 6]. В порівнянні з режимами гідродинамічного мащення ці режими характеризуються зменшенням розклинюючого тиску та гідравлічної щільності в проміжку пар тертя, що забезпечує мастило. Саме за цих умов виявляється перевага рідкокристалічних властивостей мастила орієнтаційної впорядкованості та структурованості його молекул, товщини впорядкованого граничного шару, крайових кутів мащення, і характеристик, які присутні лише у вуглеводних рідин [7, 8].

Рідкокристалічні властивості мастила виявляються лише біля твердої поверхні, з якою воно контактує [9, 10]. Під час віддалення молекул мастила від поверхні рівень їх структурованості стрибкоподібно спадає [11, 12]. Моторні мастила, що використовуються в суднових дизелях, характеризуються більшим ступенем структурованості в порівнянні з мастилами, що використовуються в медичній, харчовій та хімічній промисловості. Товщина впорядкованого граничного шару моторних мастил досягає 10 ... 12 мкм, це обумовлює підвищення в'язкості мастила в граничному шарі, сприяє підвищенню його пружно-демпфуючих властивостей та може використовуватися під час експлуатації суднових дизелів як спосіб, що забезпечує перебіг процесу граничного тертя / граничного мащення без безпосереднього контакту поверхонь [13, 14].

Суднові чотиритактні дизелі, які можуть передавати потужність гребному гвинту та в такому випадку виконувати функції головного двигуна, або забезпечувати обертальний рух ротора електрогенератора,

будучи при цьому допоміжними, характеризуються поєднаною системою мащення. При цьому деталі циліндрової групи (трибосполучення поршневі кільця – втулка циліндра) та колінчастого валу (трибосполучення вал – вкладиш рамового чи мотильового підшипника) змащуються одним та тем же моторним мастилом, яке піддається впливу теплових та механічних навантажень. З часом це погіршує його експлуатаційні характеристики – в'язкість, загальне лужне число, температуру спалаху, а також призводить до поступового збільшення в ньому продуктів зносу та забруднення. Одночасно з цим зменшується гідравлічна щільність, яку забезпечує мастило між парами тертя, режими мащення змінюються з гідродинамічного на змішаний та граничний, збільшуються механічні втрати під час отримання корисної роботи. Саме за цих умов актуальним стає завдання активації рідкокристалічних властивостей моторного мастила та використання його структурних характеристик. Підвищення структурних характеристик моторного мастила (насамперед товщини граничного впорядкованого шару молекул) досягається шляхом додавання до мастила поверхнево-активних речовин (ПАР) та нанесення на поверхні тертя наночарів органічних покриттів, зміцненням поверхонь окремими хімічними елементами, використанням електромагнітного випромінювання та ін. [15, 16].

Дослідження з визначення впливу структурних характеристик моторного мастила на експлуатаційні показники суднових дизелів виконувались на судні класу Bulk Carrier дедвейтом 37620 т. Як допоміжні двигуни на судні використовувались чотиритактні дизелі 6L23/30 MAN-Diesel&Turbo з номінальною потужністю 960 кВт та частотою обертання колінчастого валу 900 хв^{-1} . Спрощена схема системи циркуляційного мащення дизеля наведена на рис. 1.

Забезпечення режимів мащення виконувалось в такій спосіб. Кожний з дизелів (№ 1 – позиція 1, № 2 – позиція 2, № 3 – позиція 4 на рис. 1) мав окремий циркуляційний насос 7, який з картера дизеля через фільтр 8 спрямовував мастило до колінчастого валу. Продуктивність циркуляційного насосу визначалась за допомогою витратоміру 6. Далі мастило скрізь свердлення в валу та шатуну потрапляло до рамового, мотильового та головного підшипників. Це забезпечувало мащення підшипникових вузлів дизеля. Мащення циліндрової групи забезпечувалось через розбризкування та аеродиспергування мастила з картера дизеля. Сепарація мастила здійснювалась за допомогою відцентрового сепаратора 5 окремо для кожного з дизелів. Окрема циркуляція та сепарація мастила запобігала його змішуванню між системами мащення дизелів. Це сприяло коректному проведенню

експериментів та підвищувало рівень оцінки технічного стану мастила для кожного дизеля. В системі циркуляційного мащення дизеля № 1 встановлювався дозуючий пристрій 10. За його допомогою до потоку мастила додавалась ПАР, до складу якої входили розчинені соли міді та олеат калію. Кількість ПАР регулювалась мікроконтролером 9 з урахуванням обсягу мастила, що вимірювався витратоміром. Оптимальна концентрація ПАР в мастилі була встановлена під час попередніх досліджень. Під час її визначення переважним вважалась здатність ПАР сприяти утворенню біля поверхні граничних шарів з більшою товщиною на більшому ступені орієнтаційної впорядкованості.

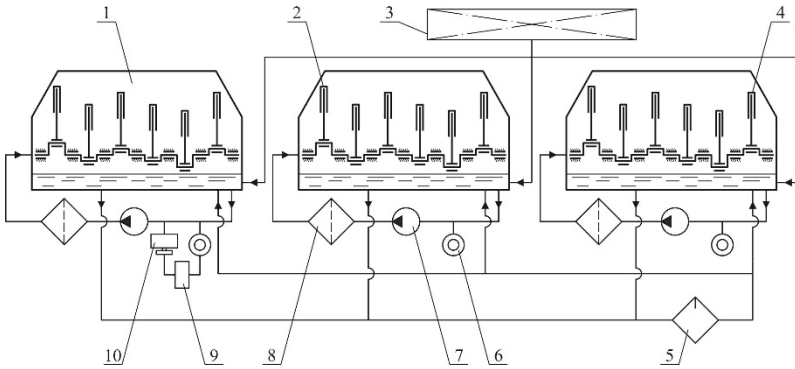


Рис. 1. Система циркуляційного мащення суднових дизелів 6L23/30 MAN-Diesel&Turbo (фрагмент):

- 1 – дизель № 1; 2 – дизель № 2; 3 – витратна цистерна системи циркуляційного мащення; 4 – дизель № 3; 5 – сепаратор; 6 – витратомір; 7 – циркуляційний насос; 8 – фільтр; 9 – мікроконтролер; 10 – дозуючий пристрій

Експлуатація суднових дизелів 6L23/30 MAN-Diesel&Turbo здійснювалась з використанням суднових моторних палив RMA10 (під час знаходження судна в зонах спеціального екологічного контролю емісії оксидів сірки – SECAs, в яких вміст сірки в паливі не повинен перевищувати 0,1 % за масою), а також VLSFO та RMG380 (під час експлуатації судна поза зонами SECAs, в яких дозволяється використовувати палива зі вмістом сірки до 0,5 % за масою). Основні характеристики моторних палив RMA10, VLSFO та RMG380 наведені в табл. 1.

Таблиця 1

Основні характеристики моторних палив

Характеристика	RMA10	VLSFO	RMG380
Густина за 15 °С, кг/м ³	922	949	991
В'язкість за 50 °С, мм ² /с	7,2	215	380
Температура спалаху, °С	65	70	76
Вміст сірки, %	0,08	0,44	0,5
Нижча теплотворна здатність, кДж/кг	42210	41860	41600

В циркуляційній системі мащення використовувалось моторне мастило Mobilgard320, яке відноситься до середньолужного класу та рекомендовано концерном MAN-Diesel&Turbo як мастило для суднових форсованих середньооберткових дизелів експлуатація яких тривалий час здійснюється на важких паливах зі вмістом сірки до 0,5 % за масою. Основні характеристики моторного мастила Mobilgard320 наведені в табл. 2.

Таблиця 2

Основні характеристики моторного мастила Mobilgard320

Характеристика	Значення
Густина за 15 °С, кг/м ³	863
В'язкість за 40 °С, мм ² /с	142
В'язкість за 100 °С, мм ² /с	14,6
Температура спалаху, °С	>200
Загальне лужне число (TBN), мгКОН/г	17,45

З метою визначення впливу структурних параметрів моторного мастила Mobilgard320 на експлуатаційні характеристики суднового дизеля 6L23/30 MAN-Diesel&Turbo визначались його наступні показники: температура випускних газів $t_{вг}$, механічний коефіцієнт корисної дії (ККД) η_m , тиск наприкінці стиснення p_c . Крім вказаних показників контролювались також всі інші, що необхідні під час технічного обслуговування та діагностування дизеля [17, 18]. В випадку, коли відхилення контрольованого показника перевищувало встановлені інструкцією з експлуатації значення, виконувалось його автоматичне регулювання шляхом нанесення регулюючої дії [19, 20].

Температура випускних газів приймалась як критерій теплової напруженості дизеля. Її збільшення вважалось показником погіршення

технічного стану поршневих кілець та виникнення за цими обставинами зайвого закиду мастила на дзеркало циліндрової втулки.

Тиск наприкінці стиснення приймався як критерій технічного стану поршневих кілець та як показник, що характеризує гідравлічну щільність в трибосполученні поршневі кільця – втулка циліндра. Зменшення тиску наприкінці стиснення (у одного дизеля в порівнянні з іншим, що працює на такому ж навантаженні) свідчило за погіршення пружнодемпфуючих характеристик мастила та виникнення контактів між поршневими кільцями та втулкою.

Механічний ККД приймався як критерій, що характеризує втрати енергії під час отримання корисної роботи. Його визначення виконувалось методом постійної витрати палива, за умовою спалювання на всіх навантаженнях дизеля одного та того ж обсягу палива, якій обирався рівним $0,01 \text{ м}^3$.

Вимірювання всіх показників, що характеризують роботу дизеля, забезпечувалось системою контролю та діагностики Doctor [21, 22].

Основною характеристикою моторного мастила, зміна якої контролювалась під час випробувань та у подальшому використовувалась як критерій його стану, було загальне лужне число – TBN. Ця величина в певні проміжки часу визначалась за допомогою судової діагностичної лабораторії фірми Unitor. Під час випробувань також контролювались інші показники моторного мастила – вміст води та механічних домішок, густина та в'язкість. Компенсація витрати мастила на вигар здійснювалась шляхом додавання мастила з витратної цистерни системи циркуляційного мащення (позиція 3 на рис. 1) до картеру дизеля із розрахунку $100 \text{ літрів} / 100 \text{ годин}$ роботи.

На початок та під час проведення досліджень дизелі мали однаковий технічний стан елементів та обладнання, що входить до їх систем: паливної, мащення, повітряпостачання та випуску газів, а також співпадаючий час попередньої роботи. Також однаковими підтримувались значення тиску та температури робочих речовин (мастила та води) в системах мащення та охолодження. Під час випробувань дизелі експлуатувались однаковий час на однаковому навантаженні, це контролювалось як за умови паралельної роботи дизелів (двох або трьох), також і за умови поодинокій роботи дизелів [23, 24].

Визначення вказаних показників виконувалось кожні 100 годин роботи дизелів. При цьому значення навантаження на дизель під час фіксації показників відрізнялось від навантаження аналогічного циклу вимірювань, що виконувався в інший часовий проміжок. Але

навантаження на різні дизелі в однаковий проміжок дослідження були однаковими.

Як показник, що характеризує структурні параметри моторного мастила, обиралась товщина впорядкованого граничного шару мастила d_s , який утворюється біля металевої поверхні. Його визначення виконувалось в науково-дослідній лабораторії за допомогою оптичного методу подвійного променезаломлювання [25, 26].

Зміна структурних характеристик моторного мастила забезпечувалась шляхом використання ПАР та нанесенням тонкого шару (20 ... 50 нм) органічних покриттів на поверхні тертя. ПАР додавалась до мастила на протязі всього часу проведення експерименту. Органічні покриття наносились на поверхні вкладишів підшипників колінчатого валу під час їх заміни. ПАР додавалась в циркуляційну систему лише одного з дизелів (позиція 1 на рис. 1), нанесення органічних покриттів виконувалось для вкладишів підшипників двох дизелів (позиції 1, 2 на рис. 1). На одному з дизелів (позиція 3 на рис. 1), ніяких із вказаних змін не виконувалось.

Як критерії забезпечення процесу мащення, через абсолютні значення контрольованих параметрів (t_{br} , η_m , p_c) визначались їх відносні відхилення:

збільшення тиску наприкінці стиснення

$$\Delta p_c = \frac{p_c^{\max} - p_c^{\min}}{p_c^{\min}} \cdot 100 \% ; \quad (1)$$

збільшення механічного ККД

$$\Delta \eta_m = \frac{\eta_m^{\max} - \eta_m^{\min}}{\eta_m^{\min}} \cdot 100 \% ; \quad (2)$$

зменшення температури випускних газів

$$\Delta t_{br} = \frac{t_{br}^{\max} - t_{br}^{\min}}{t_{br}^{\min}} \cdot 100 \% , \quad (3)$$

де p_c^{\max} , p_c^{\min} , η_m^{\max} , η_m^{\min} , t_{br}^{\max} , t_{br}^{\min} – максимальне та мінімальне значення показників дизелів в певний проміжок часу.

З метою оцінки динаміки зміни TBN мастила за виразом

$$V_{TBN} = \frac{TBN_i - TBN_{i-1}}{t_i - t_{i-1}} \cdot 100 \quad (4)$$

визначалась швидкість його зміни, в якому позначення TBN_i , TBN_{i-1} , t_i , t_{i-1} відповідають поточному та попередньому значенням відповідних показників. Розмірність V_{TBN} – (мгКОН/г)/год, співмножник 100

введено з метою кращої візуалізації значень швидкості зміни TBN в зв'язку з їх невеликим абсолютним значенням.

Результати досліджень, а також розрахунків за виразами (1) ... (4) наведені в табл. 3, 4. При цьому під 1, 2, 3 прийнято: додавання до обсягу мастила ПАР та нанесення на поверхні вкладишів підшипників шару органічного покриття, експлуатація без будь яких змін.

За результатами, що наведені в табл. 3, 4 побудовані номограми, що відображають зміну контрольованих показників за різних умов експлуатації циркуляційної системи мащення дизелів 6L23/30 MAN-Diesel&Turbo (рис. 2, 3).

Дослідження, що виконувалися в науково-дослідницькій лабораторії, дозволили встановити зміну товщини впорядкованого граничного шару молекул моторного мастила Mobilgard320 за різний час та різних умов експлуатації судового дизеля 6L23/30 MAN-Diesel&Turbo (рис. 4).

Зіставлення результатів, що наведені на рис. 4, а також в табл. 2, 3 та на рис. 2, 3 свідчить, що під час експлуатації моторного мастила, яке має більш виражені структурні параметри (більшу товщину впорядкованого граничного шару мастила) забезпечуються на більш високому рівні енергетичні та теплотехнічні показники роботи дизеля, а також підтримуються експлуатаційні характеристики мастила.

Під час досліджень не було зафіксовано жодних критичних відхилень показників роботи дизеля [27, 28]. Фіксація та збереження результатів випробувань виконувалось за допомогою спеціального програмного забезпеченням з управління активами на морських судах [29, 30].

Результати, що отримані під час досліджень, дозволяють зробити наступні висновки.

Моторні мастила, що використовуються в циркуляційній системі мащення судових чотиритактних дизелів, піддаються впливу високих температур (під час мащення деталей циліндрової групи) та високих тисків (під час мащення підшипників колінчатого валу). З часом це погіршує експлуатаційні характеристики моторного мастила при цьому:

підвищується окислення мастила, що підтверджується зниженням загального лужного числа TBN);

знижується гідравлічна щільність моторного мастила в парах тертя поршневі кільця – втулка циліндра та вал – вкладиш підшипника, що призводить до зменшення тиску наприкінці процесу стиснення;

погіршуються пружнодемпфуючі властивості мастила, що супроводжується підвищенням температури випускних газів дизеля через закид зайвого мастила на дзеркало циліндрової втулки.

Таблиця 3

Результати досліджень

Час, год	Навантаження, %	Загальне лужне число, ТВН, мгКОН/г			Температура газів, $t_{\text{вт}}$, °С			Механічний ККД, $\eta_{\text{мс}}$, %			Тиск стиснення, p_c , МПа		
		1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	70,0	17,45	17,45	17,45	282	283	283	88,2	88,2	88,1	9,6	9,6	9,55
200	75,0	17,3	17,2	16,9	285	287	291	88,9	88,8	88,5	9,75	9,7	9,6
400	65,0	17	16,8	16,2	272	274	278	87,3	87,1	86,5	9,45	9,35	9,15
600	60,0	16,9	16,5	15,5	263	263	271	85,9	85,6	84,6	9,15	9	8,75
800	80,0	16,8	16,3	14,8	293	296	306	89,3	89,1	88,3	9,8	9,7	9,55
1000	50,0	16,7	16,1	14,2	248	250	259	84,8	84,5	82,7	8,9	8,65	8,3

Таблиця 4

Результати розрахунку відносних відхилень параметрів

Час, год	Навантаження, %	Швидкість зміни ТВН, $I_{\text{ТВН}}$			Відносне зменшення $t_{\text{вт}}$, $\Delta t_{\text{вт}}$, %			Відносне збільшення $\eta_{\text{мс}}$, $\Delta \eta_{\text{мс}}$, %			Відносне збільшення p_c , Δp_c , %		
		1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
200	75,0	0,15	0,25	0,55	2,11	1,39	0,46	0,34	1,56	1,04			
400	65,0	0,3	0,4	0,7	2,21	1,46	0,92	0,69	3,28	2,19			
600	60,0	0,1	0,3	0,7	3,04	3,04	1,53	1,18	4,57	2,86			
800	80,0	0,1	0,2	0,7	4,44	3,38	1,13	0,91	2,62	1,57			
1000	50,0	0,1	0,2	0,6	4,44	3,6	2,54	2,18	7,23	4,22			

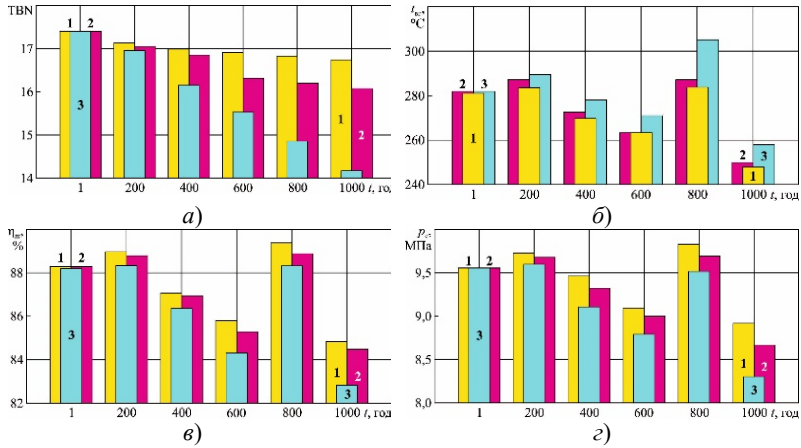


Рис. 2. Зміна контрольованих показників за різних умов експлуатації циркуляційної системи мащення дизелів 6L23/30 MAN-Diesel&Turbo: *а* – загальне лужне число; *б* – температура випускних газів; *в* – механічний ККД; *г* – тиск наприкінці стиснення; 1 – додавання до обсягу мастила ПАР та нанесення на поверхні вкладишів підшипників шару органічного покриття; 2 – нанесення на поверхні вкладишів підшипників шару органічного покриття; 3 – експлуатація без будь яких змін

Як спосіб, що сприяє тривалому підтриманню експлуатаційних характеристик моторного мастила та забезпеченню режимів мащення суднових чотиритактних дизелів, доцільно виконувати активацію його рідкокристалічних властивостей. Найбільш доцільним та зручним варіантом для суднових чотиритактних дизелів є використання поверхнево-активних речовин та нанесення додаткових наночарів спеціальних органічних покриттів на поверхні тертя. При цьому товщина впорядкованого граничного шару моторного мастила збільшується зі значень 6,8 ... 10,7 мкм до значень 12,4 ... 13,7 мкм (для різних часових інтервалів відбору проб). Це (для різних режимів навантаження дизеля та різного часу його експлуатації) забезпечує:

зниження швидкості окислення моторного мастила зі значень 0,55 ... 0,7 (мгКОН/г)/год у випадку звичайної експлуатації циркуляційної системи мащення до 0,2 ... 0,4 (мгКОН/г)/год у випадку нанесення на поверхні вкладишів підшипників шару органічного покриття та до 0,1 ... 0,3 (мгКОН/г)/год у випадку додавання до обсягу

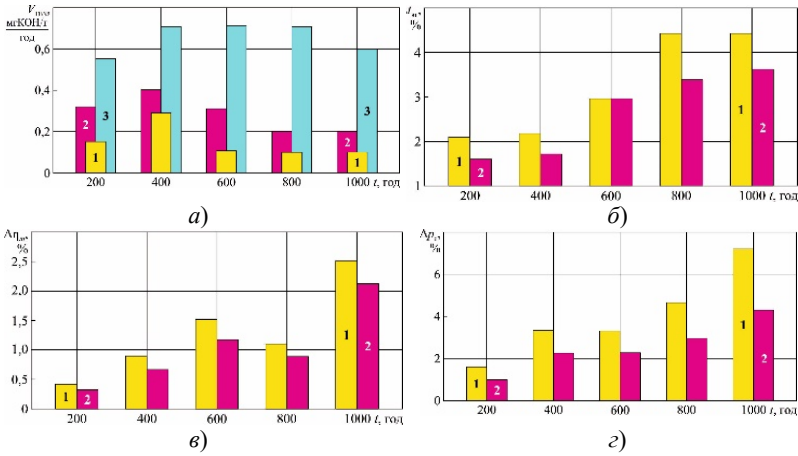


Рис. 3. Критерії забезпечення процесу мащення: *а* – швидкість зміни ТВН; *б* – зменшення температури випускних газів; *в* – збільшення механічного ККД; *г* – збільшення тиску наприкінці стиснення; 1 – додавання до обсягу мастила ПАР та нанесення на поверхні вкладишів підшипників шару органічного покриття; 2 – нанесення на поверхні вкладишів підшипників шару органічного покриття; 3 – експлуатація без будь яких змін

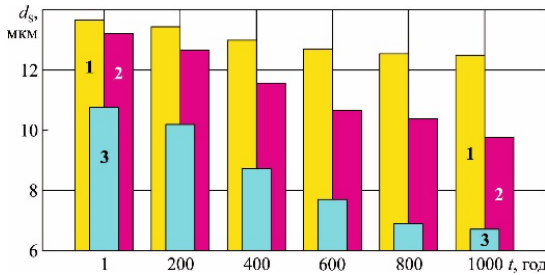


Рис. 4. Зміна товщини впорядкованого граничного шару молекул моторного мастила Mobilgard320 за різний час та різних умов експлуатації судового дизеля 6L23/30 MAN-Diesel&Turbo: 1 – додавання до обсягу мастила ПАР та нанесення на поверхні вкладишів підшипників шару органічного покриття; 2 – нанесення на поверхні вкладишів підшипників шару органічного покриття; 3 – експлуатація без будь яких змін

мастила ПАР та нанесення на поверхні вкладишів підшипників шару органічного покриття;

зниження на 1,4 ... 4,4 % температури випускних газів;

збільшення на 0,34 ... 2,54 % механічного ККД дизеля;

збільшення на 1,04 ... 7,23 % тиску наприкінці стиснення.

Наведені технології сприяють зниженню енергетичних втрат під час отримання корисної роботи та підвищують надійність роботи суднових чотиритактних дизелів.

Активация рідкокристалічних властивостей моторного мастила може бути виконана судновим екіпажем за умовою попереднього визначення оптимальної концентрації ПАР та забезпечення послідовності технологічної схеми її виконання.

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

1. Горб С.И. Повышение точности численного моделирования рабочих процессов дизелей // Автоматизация судовых технических средств: науч.-техн. сб. – 2020. – Вып. 26. – Одесса: НУ «ОМА». – С. 3 – 26.

2. Сагін С.В., Мадей В.В., Сагін А.С. Работа судового дизеля на біодизельному паливі // Автоматизація суднових технічних засобів: наук.-техн. зб. – 2021. – Вып. 27. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 93 – 107.

3. Gorb S.I., Budurov M.I. Increasing the accuracy of a marine diesel engine operation limit by thermal factor // International Review of Mechanical Engineering. – 2021. – Vol. 15(3). – P. 115 – 121.

4. 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”, Beijing. – 2019. – Part 1. – P. 139 – 145. DOI. 10.34660/INF.2019.15.36258.

5. Сагин С.В. Исследование корреляционной взаимосвязи жидкокристаллических свойств граничных смазочных слоев и реологических характеристик моторных масел судовых дизелей // Судовые энергетические установки: науч.-техн. сб. – 2014. – Вып. 33. – Одесса: ОНМА. – С. 67 – 76.

6. Поповский А.Ю., Сагин С.В. Комплексная оценка эксплуатационных характеристик смазочных углеводородных жидкостей // Автоматизация судовых технических средств: науч.-техн. сб. – 2014. – Вып. 20. – Одесса: ОНМА. – С. 74 – 83.

7. Сагін С.В. Зниження енергетичних втрат в прецизійних парах паливної апаратури суднових дизелів // Суднові енергетичні установки: наук.-техн. зб. – 2018. – Вип. 38. – Одеса: НУ «ОМА». – С. 132 - 142.

8. Поповский А.Ю., Сагин С.В. Оценка эксплуатационных свойств смазочно-охлаждающих жидкостей судовых технических средств // Автоматизация судовых технических средств: науч.-техн. сб. – 2016. – Вып. 22. – Одесса: ОНМА. – С. 66 – 74.

9. Sagin S., Madey V., Stoliaryk T. Analysis of mechanical energy losses in marine diesels // Technology Audit and Production Reserves. – 2021. – № 5 (2 (61)). – P. 26 – 32.

10. Сагин С.В. Реология моторных масел при режимах пуска и реверса судовых малооборотных дизелей // Universum. Технические науки. – 2018. – Вып. 3(48). – С. 67 – 71.

11. Сагин С.В., Заблоцкий Ю.В. Определение триботехнических характеристик поверхностей по степени упорядоченности пристенных слоев углеводородных жидкостей // Проблемы техники: наук.-виробн. журнал. – 2011. – № 3. – Одесса: ОНМУ. – С. 78 – 88.

12. Сагин С.В. Определение диапазона стратификации вязкости смазочного материала в трибологических системах судовых дизелей // Вісник Одеськ. нац. морск. ун-ту: зб. наук. праць. – 2019. – Вип. 1(58). – С. 89 – 100.

13. Зверьков Д.О., Сагін С.В. Зниження механічних втрат у суднових дизелях // Суднові енергетичні установки: наук.-техн. зб. – 2020. – Вип. 40. – Одеса: НУ «ОМА». – С. 20 – 25.

14. Мацкевич Д. В., Сагин С. В., Ханмамедов С. А. Изменение реологических характеристик смазочных материалов в циркуляционной масляной системе в процессе эксплуатации среднеоборотного двигателя // Судовые энергетические установки: науч.-техн. сб. – 2010. – Вып. 25. – Одесса: ОНМА. – С.109 – 118.

15. 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.

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. – P. 29 – 35.

17. Побережний Р.В., Сагін С.В. Забезпечення екологічних показників дизелів суден річкового та морського транспорту // Суднові енергетичні установки: наук.-техн. зб. – Вип. 41. – Одеса: НУ «ОМА». – 2020. – С. 5 – 9.

18. 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.

19. Горб С.И. Оптимизация главного двигателя на режиме экономического хода судна // Автоматизация судовых технических средств: науч.-техн. сб. – 2019. – Вып. 25. – Одесса: НУ «ОМА». – С. 17 – 34.

20. Куропятник А.А., Сагин С.В. Управление выпускными газами судовых дизелей для обеспечения экологических показателей // Автоматизация судовых технических средств: науч.-техн. сборник. – 2018. – Вып. 24. – Одесса: НУ «ОМА». – С. 72 – 80.

21. Sagin S., Kuropyatnyk O., Sagin A., Tkachenko I., Fomin O., Pištěk V., Kučera P. Ensuring the Environmental Friendliness of Drillships during Their Operation in Special Ecological Regions of Northern Europe // Journal of Marine Science and Engineering. – 2022. – Vol. 10(9). – P. 1331.

22. Sagin S.V., Kuropyatnyk O.A., Zablotskiy Yu.V. Gaichenia O.V. Supplying of Marine Diesel Engine Ecological Parameters // Nase More: International Journal of Maritime Science & Technology. – 2022. – Vol. 69. – Iss. 1. – P. 53 – 61.

23. Горб С.И., Будуров Н.И. Оптимизация автоматического регулирования частоты вращения судового дизеля // Автоматизація суднових технічних засобів: наук.-техн. зб. – 2021. – Вип. 27. – Одесса: НУ «ОМА». – С. 3 – 21.

24. Сагин С.В., Столярик Т.О. Динаміка суднових дизелів під час використання моторних мастил з різними структурними характеристиками // Автоматизація суднових технічних засобів: наук.-техн. зб. – 2021. – Вип. 27. – Одеса: НУ «ОМА». – С. 108 – 119.

25. Сагин С. В., Заблоцкий Ю. В. Влияние анизотропных жидкостей на работу узлов трения судовых дизелей // Проблемы техники: наук.-виборн. журнал. – 2012. – № 4. – Одесса: ОНМУ. – С. 68 – 81.

26. 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. – Одесса: ОНМА. – С.116 – 125.

27. Sagin S.V., Kuropyatnik A.A. Application of the system of recirculation of exhaust gases for the reduction of the concentration of nitric oxides in the exhaust gases of the ship diesels // American Scientific Journal. – 2017. – № 15. – Iss. 2. – P. 67 – 71.

28. 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. – 2021. – № 7-8. – P. 36 – 43.

29. Горб С.И. Мониторинг энергоэффективности судов // Автоматизация судовых технических средств: науч.-техн. сб. – 2015. – Вып. 21. – Одесса: НУ «ОМА». – С. 48 – 53.

30. Горб С.И., Горб А.С. Программное обеспечение для управления активами на судах // Автоматизация судовых технических средств: науч.-техн. сб. – 2018. – Вып. 24. – Одесса: НУ «ОМА». С. 34 – 48.

Анотація – Наведені результати досліджень, щодо забезпечення режимів мащення суднових чотиритактних дизелів. Випробування виконувались на дизелях 6L23/30 MAN-Diesel&Turbo, які в кількості трьох одиниць входили до складу допоміжної енергетичної установки судна класу Bulk Carrier дедвейтом 37620 т. В циркуляційній системі мащення дизелів використовувалось моторне мастило Mobilgard320, що відноситься до мастил середньолужного класу. Умови роботи моторного мастила для двох дизелів змінювались шляхом активації його рідкокристалічних властивостей. Це забезпечувалось нанесенням на поверхні вкладишів підшипників одного з них органічних покриттів та нанесенням на поверхні вкладишів підшипників органічних покриттів та постійним додаванням до обсягу мастила поверхнево-активної речовини – для іншого. Експериментально доведено, що при цьому товщина впорядкованого граничного шару моторного мастила збільшується зі значень 6,8 ... 10,7 мкм до значень 12,4 ... 13,7 мкм (для різних часових інтервалів відбору проб). Це (в діапазоні навантаження на дизель 50 ... 80 % та часового інтервалу його експлуатації 100 ... 1000 годин) в порівнянні з дизелем, експлуатація якого здійснювалась без змін умов роботи моторного мастила, забезпечує: зниження швидкості окислення моторного мастила зі значень 0,55 ... 0,7 (мгКОН/г)/год у випадку звичайної експлуатації циркуляційної системи мащення до 0,2 ... 0,4 (мгКОН/г)/год у випадку нанесення на поверхні вкладишів підшипників шару органічного покриття та до 0,1 ... 0,3 (мгКОН/г)/год у випадку додавання до обсягу мастила ПАР та нанесення на поверхні вкладишів підшипників шару органічного покриття; зниження на 1,4 ... 4,4 % температури вихідних газів; збільшення на 0,34 ... 2,54 % механічного ККД дизеля; збільшення на 1,04 ... 7,23 % тиску наприкінці стиснення. Наведені технології сприяють зниженню енергетичних втрат під час отримання корисної

роботи та підвищують надійність роботи суднових чотиритактних дизелів. Активація рідкокристалічних властивостей моторного мастила може бути виконана судновим екіпажем за умови попереднього визначення оптимальної концентрації поверхнево-активної речовини та забезпечення послідовності технологічної схеми її виконання.

Annotation – The results of research on ensuring the lubrication regimes of marine four-stroke diesel engines are presented. The tests were performed on 6L23/30 MAN-Diesel&Turbo diesel engines, which in the amount of three units were part of the auxiliary power plant of the Bulk Carrier class vessel with a deadweight of 37,620 tons. Mobilgard320 motor oil, which belongs to the medium-alkaline class, was used in the circulation system of diesel engines. The operating conditions of the engine lubricant for two diesel engines were changed by activating its liquid-crystalline properties. This was ensured by the application of organic coatings on the surface of the bearing liners of one of them and the application of organic coatings on the surface of the bearing liners and the constant addition of a surface-active substance to the volume of lubricant – for the other. It has been experimentally proven that the thickness of the ordered boundary layer of motor oil increases from values of 6.8 ... 10.7 μm to values of 12.4 ... 13.7 μm (for different time intervals of sampling). This (within the diesel load range of 50 ... 80 % and the time interval of its operation of 100 ... 1000 hours) in comparison with a diesel whose operation was carried out without changes in the operating conditions of the motor lubricant, provides: reduction of the rate of oxidation of engine oil from values of 0.55 ... 0.7 (mgKOH/g)/h in the case of normal operation of the circulating lubrication system to 0.2 ... 0.4 (mgKOH/g)/h in the case of application on the surface of the bearing liners of the organic coating layer and up to 0.1 ... 0.3 (mgKOH/g)/h in the case of adding a surfactant to the volume of lubricant and applying an organic coating layer on the surface of the bearing liners; a decrease of 1.4 ... 4.4 % in the temperature of exhaust gases; an increase of 0.34 ... 2.54 % in the mechanical efficiency of a diesel engine; increase by 1.04 ... 7.23 % of pressure at the end of compression. These technologies contribute to the reduction of energy losses during obtaining useful work and increase the reliability of the work of marine four-stroke diesel engines. Activation of the liquid crystal properties of the motor lubricant can be performed by the ship's crew, provided that the optimal concentration of the surface-active substance has been previously determined and the sequence of the technological scheme of its implementation has been ensured

УДК 665.765:62-122

ARTICLE HISTORY

Received 20.02.2023

Accepted 27.02.2023

Levinskyi Maksym

National University «Odessa Maritime Academy», Odessa, Ukraine

MaxLevinskyi@gmail.com

Automatic diagnostic of marine diesel generator lubricating oil condition

Левінський Максим Валерійович

НУ «Одеська морська академія», Одеса, Україна

MaxLevinskyi@gmail.com

Автоматична діагностика стану мастила суднового дизель-генератора

Abstract – Quality of a marine 4-stroke diesel generator engine oil is crucial for ensuring the reliable operation of these engines, which are essential for marine transportation and industry. Traditional methods of oil quality diagnostics can be time-consuming and require manual labour, which can lead to inaccuracies and delays. This work presents an analysis of ways of automatically diagnosing the quality of a marine 4-stroke diesel generator engine oil. The approaches involve using different algorithms to analyse data from various sensors and indicators in the engine, and to give engine operator suggestions if needed for necessary action. Data from a marine 4-stroke diesel generator engine is being collected under different operating conditions, and is being used to draw a conclusion regarding the current condition of the oil. Automatic diagnostic approach is accurate and efficient, and can provide real-time diagnostics of the engine oil quality. By utilizing automatic diagnostic one can potentially save time and reduce costs for engine operators and manufacturers, while also improving the overall reliability and safety of marine transportation and industry.

Резюме – Якість масла для чотиритактного дизель-генератора морських суден є вирішальною для забезпечення надійної роботи цих двигунів, які є необхідними для морського транспорту та промисловості. Традиційні методи діагностики якості масла можуть забирати багато часу та потребувати ручної праці вахтового механіка, що може призвести до неточностей та

затримок, не кажучи про те, що частота проведення таких тестів є недостатньою для того, щоб оперативно визначити швидку зміну якості масла через забруднення. Ця робота презентує аналіз методів автоматичної діагностики якості масла для чотиритактного дизельного генератора морського судна. Підходи полягають у використанні різних алгоритмів для аналізу даних з різних датчиків та індикаторів в двигуні, та в наданні рекомендацій для необхідних дій оператору двигуна, якщо це потрібно. Дані з чотиритактного дизель-генератора морського судна збираються в різних умовах експлуатації та використовуються для встановлення поточного стану масла. Підхід автоматичної діагностики є точним та ефективним, та може забезпечувати виявлення якості масла в реальному часі. Використання автоматичної діагностики може потенційно заощадити час та зменшити витрати для операторів та виробників двигунів, покращуючи загальну надійність та безпеку морського транспорту та промисловості.

DOI: 10.31653/1819-3293-2023-1-28-106-120

Marine diesel generators are crucial components of ships, providing electrical power for onboard systems and propulsion. The lubricating oil used in these generators plays a critical role in maintaining their performance and reliability [2]. However, over time, the oil can deteriorate due to factors such as oxidation, contamination, and wear.

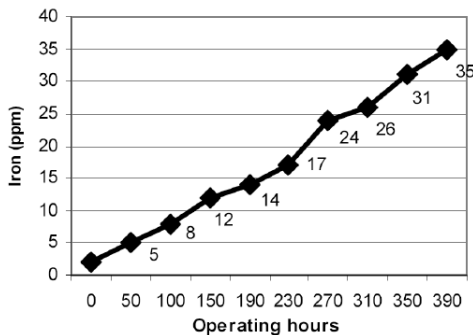


Fig. 1. Trend of iron concentration in oil [1]

Monitoring the condition of the oil is essential to prevent engine failures and downtime [1]. While manual oil analysis is a common practice, it can be

time-consuming and expensive. Automatic diagnostic systems offer a potential solution to this problem, providing real-time monitoring and diagnosis of lubricating oil condition.

The use of automatic diagnostic systems for marine diesel generator lubricating oil condition monitoring offers several benefits over manual oil analysis [5]. Real-time monitoring and diagnosis can help prevent engine failures and reduce downtime, resulting in improved reliability and efficiency. Additionally, these systems can reduce the need for manual labour and equipment, leading to cost savings. However, there are challenges to implementing these systems, such as sensor malfunction and data processing requirements [3]. Advancements in technology have made automatic diagnostic systems increasingly viable, but further research is needed to validate these systems in real-world conditions. Overall, this article aims to contribute to the understanding of automatic diagnostic systems for lubricating oil condition monitoring in marine diesel generators, with the goal of improving the reliability and efficiency of these critical systems.

Physical methods such as measuring parameters like viscosity, density, particle size etc. have been used to monitor lubricating oil condition. Chemical methods involve analysing the chemical composition of the oil, while spectroscopic methods use light absorption or emission to determine the presence of specific molecules. While each method has its advantages and disadvantages, automatic diagnostic systems can integrate multiple techniques to provide a more comprehensive assessment of oil condition.

Periodic off-line oil analysis provides significant value within reliability programs, but often it is not a sufficient tool on its own for meeting the program's reliability goals. Online oil quality monitoring systems have proven to be critical, cost saving tools, providing the data necessary to make optimal maintenance decisions [5]. Poseidon Systems' Trident is a real-time, in-line sensing technology for monitoring the health state of lubricating fluids. Technology provides continuous insight to oil health, promoting condition-based maintenance practices such as optimized fluid drain intervals and reduced dependence on offline analysis. Technology utilizes electrochemical impedance spectroscopy (EIS) to measure a fluid's impedance spectrum and track its health. The impedance spectrum provides multiple condition indicators which can be used to assess the lubricant's additive package health, monitor breakdown, and identify the presence of contaminants which helps to make maintenance decisions based on real-time information [5].

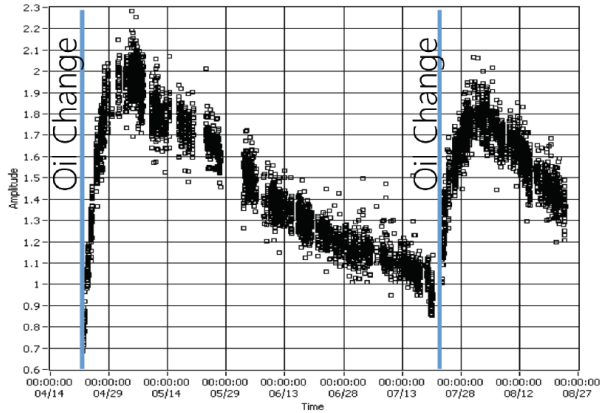


Fig. 2. Sensing method based on analyzing a fluid's electrical properties across a range of frequencies [5]

Sensor technology has played a critical role in the development of automatic diagnostic systems for lubricating oil condition monitoring. In [4] authors provide methodology for rapid analysis using Fourier-transformed infrared spectroscopy and the subsequent multivariate data analysis.

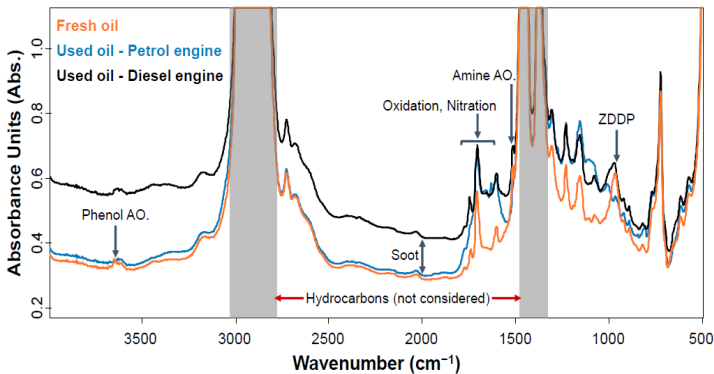


Fig. 3. Exemplary FTIR spectra of the fresh engine oil and used engine oil sample [4]

In [6] a continuous on-board diagnostic lubricant monitoring system evaluates lubricant quality and detects incipient lubricant failure due to contamination by measuring physical characteristics of the lubricant itself.

The sensors preferably include permittivity sensor, a viscosity sensor and a temperature sensor. Diagnostic testing based on the measurements can be carried out on-board via a controller running selected algorithms. A time to condemning limit for the lubricant, i.e., time until the lubricant has degraded to given quality level, is calculated based on permittivity data received by the controller. Implemented algorithm, apart from other, calculates the change in slope for the measured variables. In this way controller can give engine operator not only information about gradual oil deterioration but also quickly inform about rapid changed e.g., in permittivity, which gives information about some major malfunction (coolant contamination, excessive engine wear etc.). Patent also provides specific implementation of such system (fig. 4).

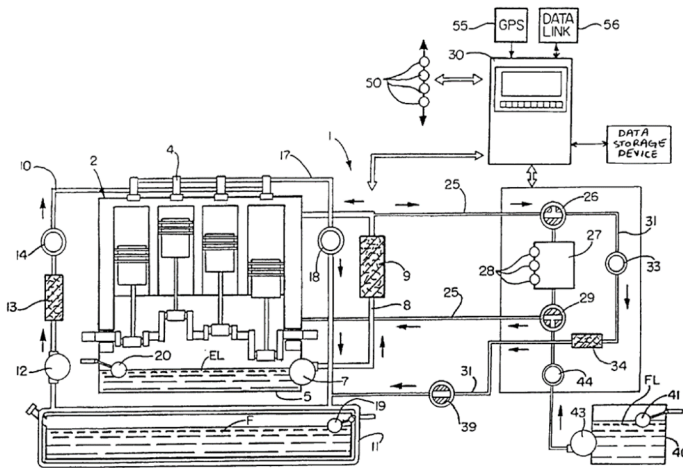


Fig. 4. Specific implementation of on-line diesel-engine lubricating oil monitoring system according to [6]

In patent [7] oil quality and contamination sensing system include a capacitive dielectric sensor and pressure sensing arrangements for measuring the dielectric constant of the oil and the pressure of the oil, respectively, with these variables being indicative of oil viscosity and contamination. The sensors take measurements as oil flows through an internal combustion engine and provide an indication of the cause of a problem with oil in an engine.

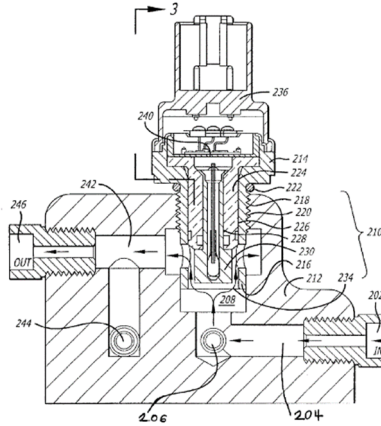


Fig. 5. A cross-sectional side view of the combined oil quality and viscosity sensing system, showing the various components of the system, including the high- and low-pressure ports, the restricted paths, the pressure sensing arrangement, the capacitive dielectric sensor and temperature sensor according to [7]

In [8] a method of detecting soot in engine oil using microwaves is described. The relative permittivity of the oil is measured in the microwave region (fig. 6).

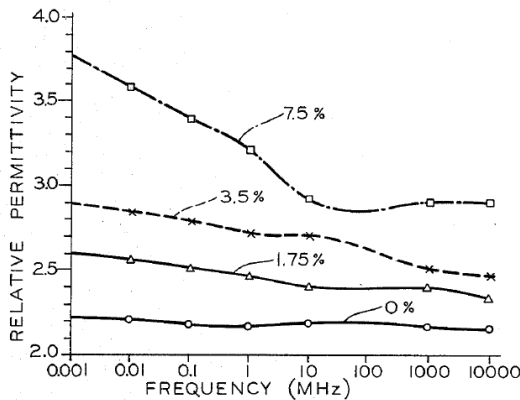


Fig. 6. Relative permittivity versus frequency for several crankcase oils at different levels of soot content [8]

In [9] a degree of deterioration of lubrication oil used in engine is detected by measuring the dielectric constant of the oil with a pair of spaced sensor capacitor electrodes placed in the oil. A voltage source of 50 – 500 kHz is a part of measuring system.

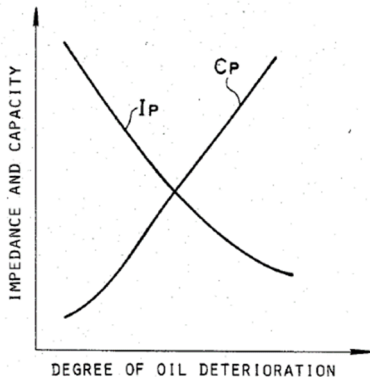


Fig. 7. Graph of variations in the impedance and capacity of the sensor capacitor as a function of lubricating oil deterioration [9]

Patent [10] describes a wear debris sensor which monitors the operation of a lubricated mechanical system. Pattern of debris concentration data indicative of damage to the mechanical system.

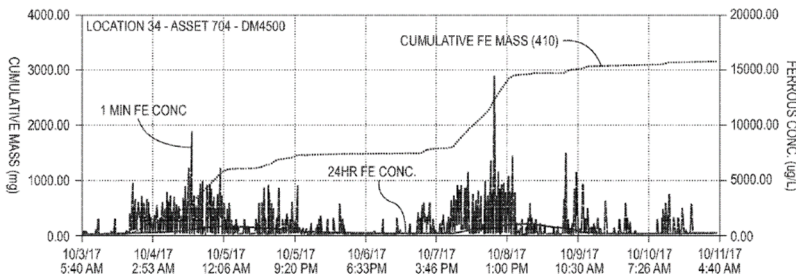


Fig. 8. Chart of the 24-hour average wear concentration and the observed cumulative wear mass over an 8-day period [10]

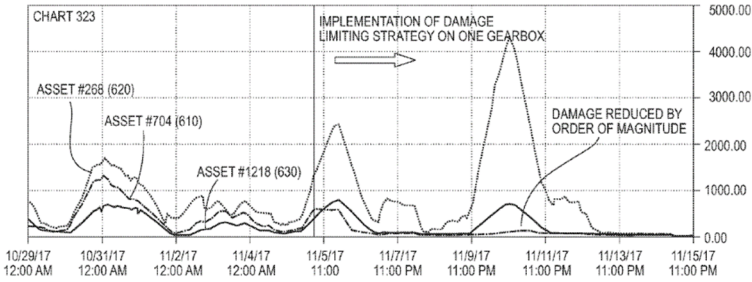


Fig. 9. Chart representing the 24-hour average wear concentration values for three lubrication systems over a 4-day period illustrating the effect of implementing a derating strategy on one of three systems with similar wear generation rates [10]

In [11] a sensor for measuring multiple properties of an oil, including level, temperature, water contamination and dielectric properties where the sensing elements include two or more interdigitated electrodes, a capacitive relative humidity sensor and a temperature sensing element.

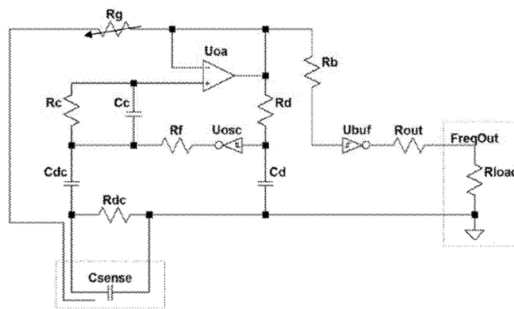


Fig. 10. Circuit diagram for use with the disclosed sensor [11]

In [12] a method and system for estimating the remaining useful life of a filter in a lubrication system includes an inductive wear debris sensor.

In [13] multi-modal fluid condition sensor platform and system are described. Real-time, simultaneous, integrated, multi-modal sensor system has been developed for early warning malfunction notification. System include temperature, magnetic, inductive, electrical impedance and optical absorption sensors.

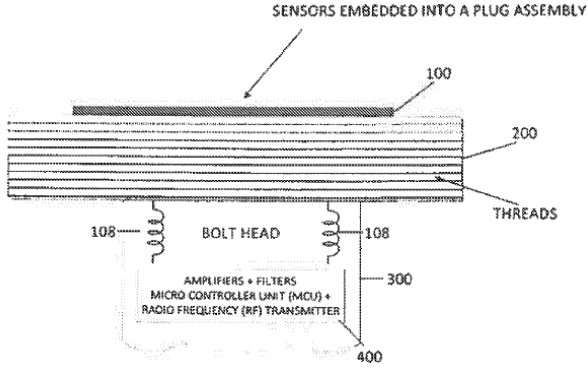


Fig. 11. A representation of an exemplary real-time multi-modal fluid sensing system described in patent [13]

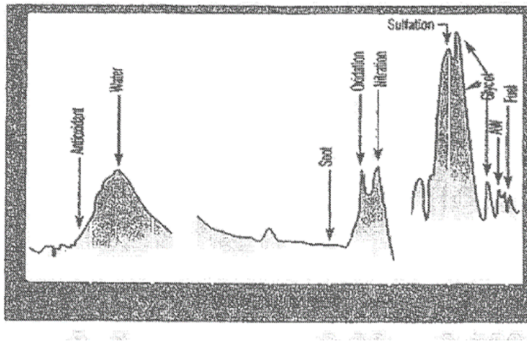


Fig. 12. A representative framework of discrete wavelengths for the various optical properties detection [13]

A Rolls-Royce Corporation patent [14] describes lubricating oil quality sensing system which applies a laser beam to the debris and detects a light signature generated by the debris in response to application of the laser beam.

A Caterpillar company patent [15] describes a system and method for activating on a user interface an indicator of a condition of a lubricant in an engine. The controller may be configured to receive a plurality of lubricant characteristics and determine a change in slope. If the change in slope exceeds a threshold – operator is being notified.

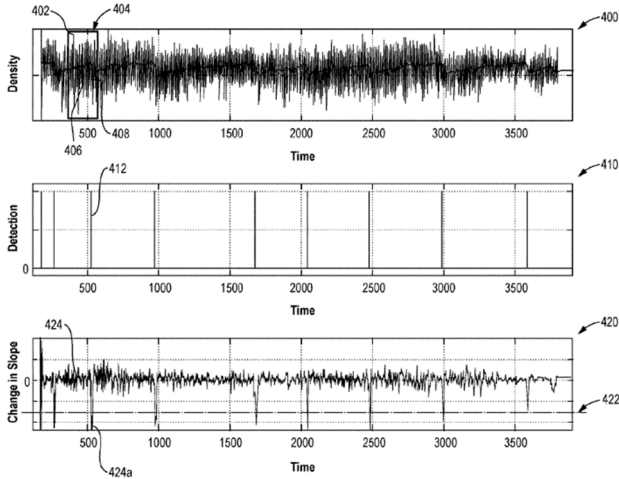


Fig. 13. Illustration exemplary related to patent [15]

In fig. 13 graphs 400, 410 and 420. Graph 400 shows the plotted lubricant characteristics 402 and the plotted slope 406 of the associated adjusted lubricant characteristics over time. The exemplary graph 420 illustrates the plotted change in slope 424 over time for the plotted slope 406. Graph 410 illustrates exemplary detection points over time associated with the change in slope 424 of graph 420 exceeding a threshold 422.

While these experimental studies have shown promising results, implementing automatic diagnostic systems for lubricating oil condition monitoring in real-world maritime environment conditions presents several challenges. The variability of engine operating conditions and oil properties can affect the accuracy and reliability of these systems.

Implementing automatic diagnostic systems for marine diesel generator lubricating oil condition monitoring requires careful consideration of various factors, such as sensor selection, data collection and processing, and choosing diagnostic algorithms.

The selection of sensors depends on several factors, such as the specific condition being monitored and the cost of the sensors. In general, a combination of sensors is used to provide a more comprehensive assessment of oil condition.

Automatic diagnostic systems collect data from the sensors in real-time and process the data using specific algorithms. The data collected includes various parameters such as viscosity, acidity, permittivity and oxidation

products. Machine learning algorithms can analyze these parameters and provide real-time predictions of oil condition.

Data processing is a crucial aspect of automatic diagnostic systems. The data must be filtered and processed to remove noise and irrelevant information. Additionally, the algorithms must be trained on a large dataset of oil condition data to provide accurate predictions.

Various machine learning algorithms can be used to analyze the data collected from the sensors. Some of the commonly used algorithms include neural networks, support vector machines, and decision trees. These algorithms can be trained using supervised or unsupervised learning methods.

The selection of machine learning algorithms depends on several factors, such as the size of the dataset and the specific condition being monitored. Neural networks are commonly used for large datasets, while decision trees are useful for smaller datasets.

Implementing automatic diagnostic systems for marine diesel generator lubricating oil condition monitoring faces several challenges and limitations. Sensor malfunction and data processing requirements can pose challenges to these systems. Additionally, the accuracy of the predictions can be affected by the variability in the oil properties and the complexity of the engine components.

Moreover, the cost of implementing automatic diagnostic systems can be a limiting factor, especially for small-scale operators. The complexity of these systems can also require specialized knowledge and training, making them difficult to implement without proper expertise.

The implementation of automatic diagnostic systems for marine diesel generator lubricating oil condition monitoring offers significant benefits for the reliability and efficiency of these critical systems. The selection of sensors, data collection and processing, and machine learning algorithms are crucial aspects of implementing these systems. Despite the challenges and limitations, advancements in technology have made automatic diagnostic systems increasingly viable.

Future research directions

Potential applications of automatic diagnostic systems for marine diesel generator lubricating oil condition monitoring extend beyond the maritime industry. These systems can also be used in other industrial applications where lubricating oil is used. Future research could focus on improving the accuracy and reliability of these systems by incorporating more advanced machine learning and artificial intelligence algorithms. Additionally, investigating the potential of using these systems for predictive maintenance could lead to significant cost savings.

Conclusion

The use of automatic diagnostic systems is becoming increasingly important in the marine industry, particularly for monitoring the condition of lubricating oil in diesel generators. These systems provide a range of benefits, including early detection of faults and lubricating oil degradation, lower maintenance costs, and improved operational efficiency.

One of the most significant advantages of these systems is their ability to detect potential issues before they become major problems. By identifying problems early on, operators can take corrective action before they escalate, minimizing downtime and costly repairs.

In addition, automatic diagnostic systems can help reduce maintenance costs. By monitoring the condition of lubricating oil, these systems can identify when oil needs to be changed, ensuring that maintenance is performed only when it is necessary. This can lead to significant cost savings, as maintenance and oil changes can be expensive.

Moreover, automatic diagnostic systems can improve operational efficiency. By monitoring the condition of lubricating oil, these systems can help ensure that diesel generators are running at peak performance, reducing fuel consumption and improving overall efficiency. This can lead to lower operating costs and a smaller environmental footprint.

However, it is important to note that there are some limitations to the implementation of automatic diagnostic systems. For example, these systems may not be able to detect all types of faults or issues, and their accuracy may be affected by factors such as environmental conditions and the quality of the data used.

To ensure that these systems are accurate and reliable, it is important to carry out thorough evaluations and validations. This involves data validation, model validation, model optimization, and real-world testing. By following these steps, operators can ensure that their automatic diagnostic systems are providing accurate and reliable results.

Automatic diagnostic systems are an essential tool for marine operators and owners looking to monitor the condition of lubricating oil in diesel generators. By providing early detection of faults, reducing maintenance costs, and improving operational efficiency, these systems offer significant benefits to the industry. While there are some limitations to their implementation, advancements in technology are making it increasingly possible to overcome these challenges. As such, automatic diagnostic systems are a worthwhile investment for any marine operator or owner looking to improve the reliability and efficiency of their equipment.

REFERENCES

1. Kaleli Hakan, and Yildirim Elifnaz. Determination of Oil Drain Period in Naval Ship Diesel Engine. //Tribology in Industry 30. 2008. – № 3. – P. 21 – 30.
2. Stoliaryk Tymur. Analysis of the Operation of Marine Diesel Engines when using Engine Oils with Different Structural Characteristics. //Technology Audit and Production Reserves 5. – 2022. – № 1(67). – P. 22 – 32.
3. Sagin Sergii and Solodovnikov Valerii. Estimation of Operational Properties of Lubricant Coolant Liquids by Optical Methods. //International Journal of Applied Engineering Research 12. – 2017. – № 19. – P. 8380 – 8391.
4. Nagy András Lajos, Agocs Adam, Ronai Bettina, Raffai Péter, Rohde-Brandenburger Jan, Besser Charlotte and Dörr Nicole. Rapid Fleet Condition Analysis through Correlating Basic Vehicle Tracking Data with Engine Oil FT-IR Spectra. //Lubricants 9. – 2021. – № 12. – P. 114 – 133.
5. Steen Stephen Why online oil quality monitoring is a best practice for reliability programs. //Uptime. – 2019. - № 26. – P. 26 – 29.
6. Van Mullekom, J. H., Melnyk, M. C., Dayal, B. S. Continuous on-board diagnostic lubricant monitoring system and method. – U.S. Patent No. 6,463,796 B1, 2002. – 20 p.
7. Park K. M. and Nassar M. A. Combined oil quality and viscosity sensing system. – U.S. Patent No. 6,553,812 B2, 2003. – 7 p.
8. Nagy L., Myers. J. Method of detecting soot in engine oil using microwaves. – U.S. Patent No. 4345202., 1982. – 6 p.
9. Yasuhara, S., Hiroshi, K., Kita, T., Saito, H. Oil deterioration detector method and apparatus. U.S. Patent No. 4646070., 1987. – 9 p.
10. Redding M. L., Brewer R. C., Steen S. N. System and method for utilizing wear debris sensor to reduce damage and extend remaining useful life of gearboxes. – U.S. Patent No. 11300106B2., 2022. – 17 p.
11. Brewer, R. C., Allen, Z. M., Marvin, T. R., Anauo, M. Capacitive fringe field oil level sensor with integrated humidity and temperature sensing. – U.S. Patent No. 2020/0319011A1., 2020. – 14 p.
12. Pelkey Alexander T., Marvin Timothy R., Brewer Ryan C. System and method for condition-based filter changes, – U.S. Patent No. 2022/0072456. – 7 p.
13. Brian Von Herzen, Fleet Steven Van (2018) “Multi-modal fluid condition sensor platform and system therefor. – AU Patent No. 2013270490B2, 2018. – 26 p.

14. Dawn K. Andrus, Elliott Michael, Costello John, Fulford Anthony and Gebhard John (2019) On-wing component wear analysis with fluid quality sensing. – U.S. Patent No. 10180075B1, 2019. – 11 p.

15. Yanchai Zhang, Venkata Dandibhotla, Brent Kyle and Krone John (2019) Lubricant health detection system. – U.S. Patent No. 10473008B2, 2019. – 13 p.

Abstract – Quality of a marine 4-stroke diesel generator engine oil is crucial for ensuring the reliable operation of these engines, which are essential for marine transportation and industry. Traditional methods of oil quality diagnostics can be time-consuming and require manual labour, which can lead to inaccuracies and delays. This work presents an analysis of automatically diagnosing the quality of a marine 4-stroke diesel generator engine oil. The approaches involve using different algorithms to analyse data from various sensors and indicators in the engine, and to give engine operator suggestions if needed for necessary action. Data from a marine 4-stroke diesel generator engine is being collected under different operating conditions, and is being used to draw a conclusion regarding the current condition of the oil. Automatic diagnostic approach is accurate and efficient, and can provide real-time diagnostics of the engine oil quality. By utilizing automatic diagnostic one can potentially save time and reduce costs for engine operators and manufacturers, while also improving the overall reliability and safety of marine transportation and industry.

Анотація – Якість масла для чотиритактного дизель-генератора морських суден є вирішальною для забезпечення надійної роботи цих двигунів, які є необхідними для морського транспорту та промисловості. Традиційні методи діагностики якості масла можуть забирати багато часу та потребувати ручної праці вахтового механіка, що може призвести до неточностей та затримок, не кажучи про те, що частота проведення таких тестів є недостатньою для того, щоб оперативно визначити швидку зміну якості масла через забруднення. Ця робота презентує аналіз методів автоматичної діагностики якості масла для чотиритактного дизельного генератора морського судна. Підходи полягають у використанні різних алгоритмів для аналізу даних з різних датчиків та індикаторів в двигуні, та в наданні рекомендацій для необхідних дій вахтовому механіку, якщо це потрібно. Дані з чотиритактного дизель-генератора морського судна збираються в різних умовах експлуатації та використовуються для встановлення поточного стану масла.

Підхід автоматичної діагностики є точним та ефективним, та може забезпечувати виявлення якості масла в реальному часі. Використання автоматичної діагностики може потенційно заощадити час та зменшити витрати для операторів та виробників двигунів, покращуючи загальну надійність та безпеку морського транспорту та промисловості. Розглянуті в роботі підходи базуються на використанні інтелектуальних алгоритмів, що дозволяє отримати достовірні результати без втручання людини. Крім того, перспективними напрямками можуть бути використання сучасних технологій інтернету речей та хмарних технологій для моніторингу якості масла. Ці технології можуть допомогти вирішити проблему обмеженої кількості даних та дозволять віддалено моніторити якість масла в режимі реального часу. Автоматична діагностика може допомогти покращити безпеку та надійність морського транспорту та промисловості. Застосування інтелектуальних алгоритмів та сучасних технологій може покращити ефективність моніторингу якості масла та дозволить операторам забезпечувати надійну роботу двигунів при мінімальних витратах на технічне обслуговування.

UDC 629.12.056

ARTICLE HISTORY

Received 10.12.2022

Accepted 26.12.2022

Mikhailenko Vladislav Sergeevich¹, Kharchenko Roman Yurievich²,
Leshchenko Valery Vladislavovich³
NU "Odessa Maritime Academy", Odessa, Ukraine
vladmihailen@gmail.com¹, romannn30@gmail.com², lvvlvv@ukr.net³

Fuzzy method of approximating values of parameters of dynamic models of ship boilers

Михайленко В.С.¹, Харченко Р.Ю.², Лещенко В.В.³
National University "Odessa Maritime Academy", Odesa, Ukraine
vladmihailen@gmail.com¹, romannn30@gmail.com², lvvlvv@ukr.net³

Нечітка методика апроксимації значень параметрів динамічних моделей суднових КОТЛІВ

Abstract – In order to reduce the complexity of the process of calculating the thermal coefficients of the equations of the dynamics of physical processes in ship steam boilers, a new approximation technique is proposed. The methodology is based on the calculation of the values of the coefficients of the parameters of the dynamic equations describing the physical processes in the ship's steam boilers. The calculation was carried out on the three most frequently used thermal load operating modes of the steam boiler (25 %, 50 %, 75 %). The use of the fuzzy algorithm of I. Mamdani in the proposed methodology allows taking into account the nonlinear properties of physical parameters and carrying out their approximation over the entire operating range of the thermal load of ship steam boilers. To implement the fuzzy algorithm of I. Mamdani, fuzzification of boiler load parameters and differential equation coefficients was carried out in the specialized MatLab editor package (Fuzzy Logic Toolbox). The proposed technique demonstrates a high level of adequacy of experimental and theoretical values of heat coefficients during comparative analysis. The methodology allows using the obtained equations in further studies of the properties of marine steam boilers in order to improve their structural, ecological and economic characteristics. It can be noted that the analysis of the equations allows the

calculation of the setting parameters of the PID-regulator in the system of automatic control of the "fuel-air" combustion process.

Анотація – З метою зниження трудомісткості процесу розрахунку теплових коефіцієнтів рівнянь динаміки фізичних процесів у суднових парових котлах запропоновано нову методику апроксимації. Методика заснована на розрахунку значень коефіцієнтів параметрів динамічних рівнянь, що описують фізичні процеси в суднових парових котлах. Розрахунок проведений на трьох найбільш часто використовуваних теплових навантажених режимах роботи парового котла (25 %, 50 %, 75 %). Використання нечіткого алгоритму І. Мамдані у запропонованій методиці дозволяє враховувати нелінійні властивості фізичних параметрів та проводити їх апроксимацію на всьому робочому діапазоні теплового навантаження суднових парових котлів. Для реалізації нечіткого алгоритму І. Мамдані у спеціалізованому пакеті MatLab редакторі (Fuzzy Logic Toolbox) проведена фазифікація параметрів навантаження котла та коефіцієнтів диференціального рівняння. Запропонована методика демонструє високий рівень адекватності експериментальних і теоретичних значень теплових коефіцієнтів під час проведення порівняльного аналізу. Методика дозволяє використовувати отримані рівняння у подальших дослідженнях властивостей судових парових котлів з метою покращення їх конструктивних, екологічних та економічних характеристик. Можна відзначити, що аналіз рівнянь дозволяє проводити розрахунок настроювальних параметрів ПІД-регулятора в системі автоматичного керування процесом горіння "палива-повітря".

DOI: 10.31653/1819-3293-2023-1-28-121-131

It is known that the coefficient of excess air α , which cannot be directly measured, can be determined by the oxygen content in the flue gases of a ship's steam boiler (SSB) almost independently of the fuel composition [1]. The coefficient of excess air is determined by air consumption M_L and fuel consumption B_T . However, in practice, the oxygen content ΔC_{O_2} cannot be measured at a point located directly behind the end zone of the combustion process. In most cases, the sampling point is located in the convective part of the boiler. At the same time, the gases are first mixed in the combustion zone, then transported through radiative surfaces and then additionally mixed in the zone of convective heating surfaces. Deep mixing occurs in the smoke extractor (especially in the centrifugal type smoke extractors).

To determine the optimal fuel-air ratio in the processes of liquid fuel combustion in the SSB furnace, the traditional method is used at the stage of

automatic control system (ACS) development [2]. The technique is based on the calculation of the coefficients of the parameters of differential equations describing the processes of oxygen content in flue gases. The analysis of the equations allows to calculate the tuning parameters of the PID - controller in the ACS by the combustion process. Let's consider the use of the traditional technique on the example of the "fuel-air" subsystem, which can be approximated by equals [3]:

$$T_2 \frac{d^2 \Delta C_{O_2}}{dt^2} + T_1 \frac{d \Delta C_{O_2}}{dt} + \Delta C_{O_2} = k_2 \Delta M_L (t - \tau) + k_4 \Delta B_T (t - \tau), \quad (1)$$

where τ is the transport delay time; (taken to be equal to the inertia value of the gas analyzer itself, for the gas analyzer $\tau = 30$ sec):

$$T_2 = T_B^2; T_1 = 2T_B; T_B = \frac{\bar{T}_B}{3}; k_2 = \frac{21}{\bar{M}_L \bar{\alpha}}; k_4 = -\frac{21}{\bar{B}_T \bar{\alpha}},$$

where \bar{B}_T is the nominal fuel consumption, kg/sec; $\bar{\alpha}$ – coefficient of excess air; \bar{T}_B – the average time of passage of flue gases from the furnace to the place of measurement, sec.

Output data for the Mitsubishi MAS 35 SSB (35 tons of steam per hour) with mass consumption of fuel and air [4]:

$$\bar{B}_T^{75\%} = 0,54, \text{ kg/sec}; \bar{M}_L^{75\%} = 11,8, \text{ kg/sec}; \bar{\alpha}^{50\%} = 1,2;$$

$$\bar{T}_B = 12, \text{ sec}; T_B = \frac{12}{3} = 4, \text{ sec}.$$

$$\text{Then } k_2 = \frac{21}{11,8 \cdot 1,2} = 1,48, \text{ \%} \cdot \text{sec/kg}; k_4 = -\frac{21}{0,52 \cdot 1,2} = -33,9, \text{ \%} \cdot \text{sec/kg}.$$

For mode 50 % of nominal:

$$\bar{B}_T^{50\%} = 0,35, \text{ kg/sec}; \bar{M}_L^{50\%} = 5,8, \text{ kg/sec}; \bar{\alpha}^{50\%} = 1,2;$$

$$k_2 = \frac{21}{5,8 \cdot 1,2} = 3, \text{ \%} \cdot \text{sec/kg}; k_4 = -\frac{21}{0,35 \cdot 1,2} = -50, \text{ \%} \cdot \text{sec/kg}.$$

For mode 25 % of nominal:

$$\bar{B}_T^{25\%} = 0,18, \text{ kg/sec}; \bar{M}_L^{25\%} = 3,3, \text{ kg/sec}; \bar{\alpha}^{25\%} = 1,3.$$

$$\text{Then } k_2 = \frac{21}{3,3 \cdot 1,2} = 5,3, \text{ \%} \cdot \text{sec/kg}; k_4 = -\frac{21}{0,18 \cdot 1,3} = -91,3, \text{ \%} \cdot \text{sec/kg}.$$

The values of the calculations are given in Tab. 1.

After substituting the values (see Tab. 1) in (1), we obtain:

$$64 \frac{d^2 \Delta C_{O_2}}{dt^2} + 8 \frac{d \Delta C_{O_2}}{dt} + \Delta C_{O_2} = 5,3 \Delta M_L (t - 30) - 91,3 \Delta B_T (t - 30);$$

$$36 \frac{d^2 \Delta C_{O_2}}{dt^2} + 6 \frac{d \Delta C_{O_2}}{dt} + \Delta C_{O_2} = 3 \Delta M_L (t - 30) - 50 \Delta B_T (t - 30);$$

$$25 \frac{d^2 \Delta C_{O_2}}{dt^2} + 5 \frac{d \Delta C_{O_2}}{dt} + \Delta C_{O_2} = 1,5 \Delta M_L (t - 30) - 33,9 \Delta B_T (t - 30).$$

Table 1

Calculated coefficients of equation (1)

Coefficients of equation	25 %	50 %	75 %
T_2 , sec	64	36	25
T_1 , sec	8	6	5
k_2 , kg/sec % movement of the regulatory body (RB)	5,3	3,0	1,5
k_4 , kg/sec % movement of RB	-91,3	-50,0	-33,9

The solution of this system under zero initial conditions is shown in Fig. 1.

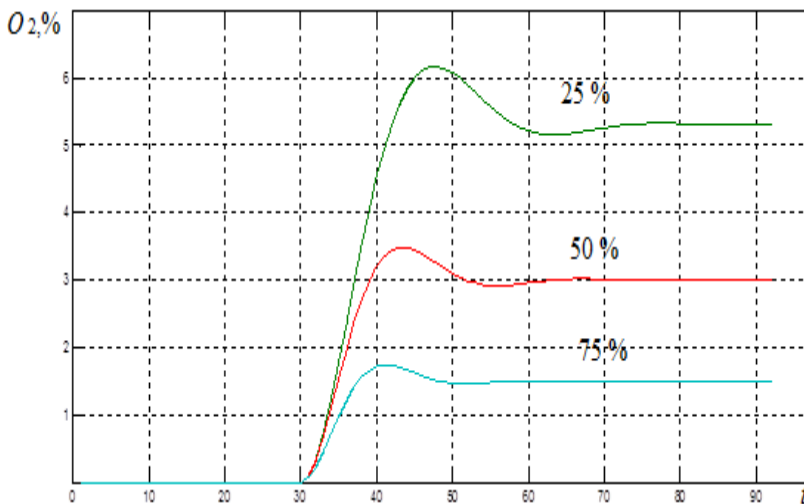


Fig. 1. Transient characteristics along the channel "change in air flow - change in O_2 content" during the heat load of the SSB (25, 50, 75 %)

At the same time, the technique presented above is laborious and takes into account the analysis of physical processes for only one operating mode of the SSB.

To reduce the complexity and speed up the process of calculating thermal coefficients, the authors present a method for approximating the thermal calculated coefficients of differential equations describing the dynamics of the controlled parameters of the SSB. As an example, for the implementation of the proposed technique, equation (1) presented above and the initial data obtained during the calculations (see Tab. 1) are used.

The first stage of the methodology for developing a fuzzy decision support system or a fuzzy expert system (FES) when identifying the parameters of SSB subsystems is the definition of input and output variables (Fig. 2). The program is implemented using the MatLab (FLT) package [5]. In the presented figure, the input parameter of FES is the thermal load of the SSB, which is determined by the current steam consumption, and the output parameters are the calculated coefficients of the dynamic equation under study (see the equation (1)).

The second stage is the process of fuzzification of input and output of the expert system (Fig. 3 – 6).

The rest of the coefficients also go through the stage of fuzzification with the help of triangular membership functions in a similar way (Fig. 6).

At the third stage, a knowledge base is developed in the MatLab package using a fuzzy inference system that implements the Sugeno algorithm [6 – 8]. At the next stage of the methodology, the adequacy of the FES is checked by comparing the values of the calculated coefficients from the table. 1 and values calculated by the program (Fig. 7).

The FES verification was also checked on two other known operating modes, the deviation of which is within the permissible limits of no more than 5 %. Taking into account the procedure of interpolation of non-linear values for the regime of 35 % heat load, the proposed FES produces the following values of heat coefficients (Fig. 7).

As can be seen from Fig. 7, the values of the coefficients obtained by the FEC correspond to the values of the table. 1 at 50 % load. Thus, the developed FES can be considered an effective tool for calculating the values of the presented equations.

At the next stage of the methodology, the values of thermal coefficients are calculated for a thermal regime of 35 % of the nominal one (the mode of operation of the SSB at the ship's parking lot). The new values are shown in Fig. 8.

The calculated values of thermal coefficients (1) determined by FES for three thermal regimes of SSB are presented in Tab. 2.

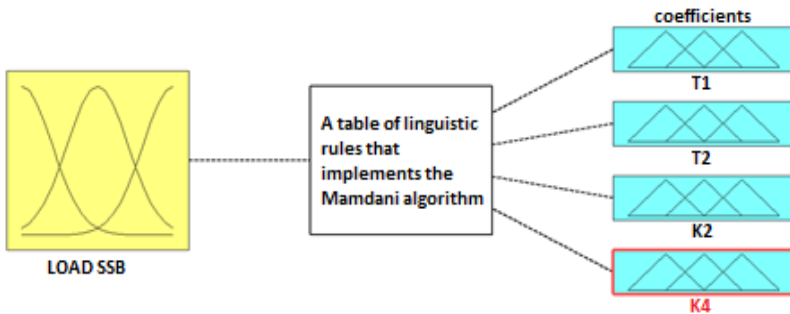


Fig. 2. A program interface synthesized by FES for calculating the thermal coefficients of the SSB depending on the thermal load

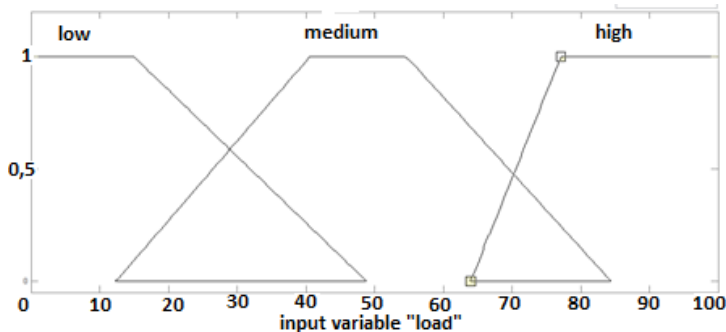


Fig. 3. The membership functions of the variable "heat load of SSB"

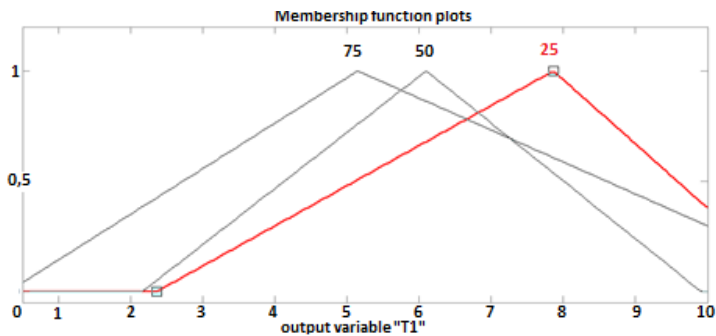


Fig. 4. Membership functions of T_1 coefficient values

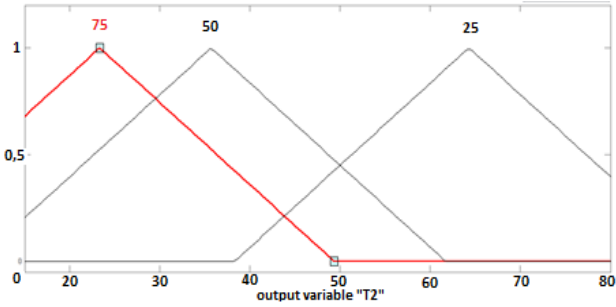


Fig. 5. Membership functions of T_2 coefficient values

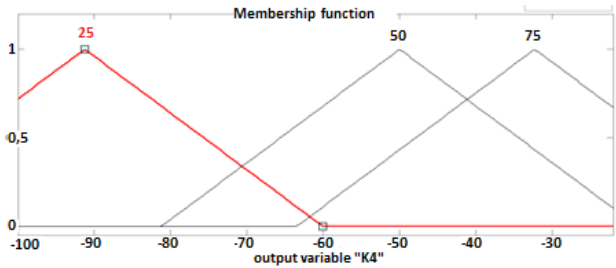


Fig. 6. Membership functions of K_4 coefficient values

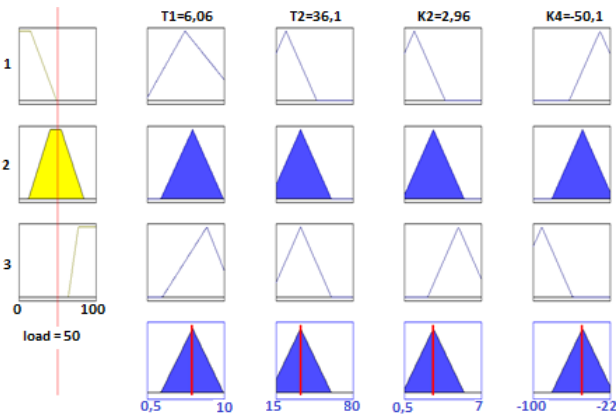


Fig. 7. Calculation of the values of the coefficients of equation (1) using the FES at a heat load of 50 %: $T_1 = 6,06$; $T_2 = 36,1$; $K_2 = 2,96$; $K_4 = -50,1$

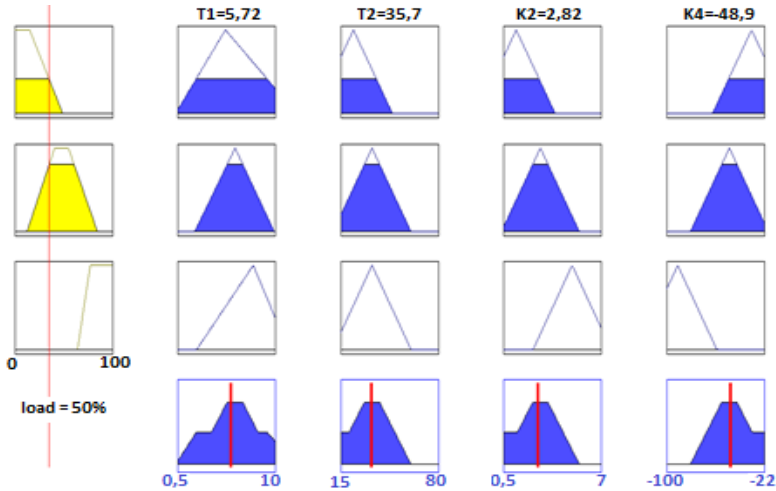


Fig. 8. The interface showing the results of the calculation of the FES of the thermal mode of the SSB, equal to 35% of the nominal

Table 2

The value of thermal coefficients

Load from nominal	17 %	35 %	85 %
T_2 , sec	64	36	25
T_1 , sec	8	6	5
k_2 , kg/sec % movement of RB	5,3	3,0	1,5
k_4 , kg/sec % movement of RB	-91,3	-50,0	-33,9

After substituting the values (see Tab. 2) in (1), we obtained:

$$64 \frac{d^2 \Delta C_{O_2}}{dt^2} + 8 \frac{d \Delta C_{O_2}}{dt} + \Delta C_{O_2} = 5,3 \Delta M_L(t-30) - 91,3 \Delta B_T(t-30);$$

$$36 \frac{d^2 \Delta C_{O_2}}{dt^2} + 6 \frac{d \Delta C_{O_2}}{dt} + \Delta C_{O_2} = 3 \Delta M_L(t-30) - 50 \Delta B_T(t-30);$$

$$25 \frac{d^2 \Delta C_{O_2}}{dt^2} + 5 \frac{d \Delta C_{O_2}}{dt} + \Delta C_{O_2} = 1,5 \Delta M_L(t-30) - 33,9 \Delta B_T(t-30).$$

In this way, the developed FES allows you to obtain the value of thermal and hydraulic coefficients for all operating modes of the SSB robots.

Knowledge of the mathematical models of the main channels of the SSB allows you to choose the optimal settings for the corresponding controllers in the ACS of the key processes of the SSB, as well as to conduct an additional study of the dynamic processes of the SSB. It can be noted that the proposed method is universal for all types of SSB.

Conclusions

A universal method of approximation of the estimated coefficients of the equations of the dynamics of the parameters of all structural types of SSB is proposed, which implements a nonlinear fuzzy inference algorithm and demonstrates a high degree of adequacy of the experimental and theoretical values of the thermal coefficients. The method allows you to use the obtained equations in further studies of the properties of SSB in order to improve their constructive, ecological and economic characteristics.

REFERENCES

1. Михайленко, В. С., Лещенко, В. В., Сакали, С. М., & Харченко, Р. Ю. (2020). Нейромережева система моніторингу показників шкідливих викидів суднового парового котла. *Automation of Ship Technical Facilities*, 26 (1), 41 – 57. <https://doi.org/10.31653/1819-3293-2020-1-26-41-57>.
2. Mikhaylenko, V. S., Kharchenko, R. Y., & Shcherbinin, V. A. (2020). Analysis of the Predicting Neural Network Person Recognition System by Picture Image. *Automatic Control and Computer Sciences*, 54(3), 249 – 258. doi:10.3103/s0146411620030037.
- Ложечников В. Ф. Аналитическая многорежимная модель динамики газовой души трюка барабанного котла / В. Ф. Ложечников, В. С. Михайленко, И. Н. Максименко // *Автоматика. Автоматизация. Электрические комплексы и системы (ААЭКС)*. – 2007. – №2(20). – С. 29 – 34.
4. Instruction manual ship auxiliary boiler MAC – 35B / Mitsubishi heavy industries, LTD. <https://pdf.nauticexpo.com/pdf/mitsubishi-heavy-industries-ship-ocean/boiler-mac-b/32135-20232.html>.
5. Леоненков А. Ю. Нечеткое моделирование в среде Matlab и fuzzyTech / А. Ю. Леоненков. – СПб.: БХВ, 2003. – 720 с.
6. Sugeno M. On stability of fuzzy systems expressed by fuzzy rules with singleton consequents / M. Sugeno // *IEEE Trans. Fuzzy Systems*. – 1997. – № 7. – P. 201 – 224.
7. Михайленко В.С. Моделювання процесу утворення шкідливих викидів у вихідних газах суднових парових котлів / В.С. Михайленко, В.А. Щербінін, В.В. Лещенко, Р.Ю. Харченко, Н.В. Ложечнікова //

Informatics and Mathematical Methods in Simulation Vol. 10 (2020), No. 3 – 4, pp. 154 – 166. doi: 10.15276/imms.v10.no3-4.154.

8. Using Neural Network Technologies to Simulate the Working Processes of Ship Steam Boilers / Mikhailenko, V.S., Kharchenko, R.Yu., Shcherbinin, V.A., Leshchenko, V.V. // CEUR Workshop Proceedings this link is disabled, 2021, 3126. P. 367 – 373.

Abstract – In order to reduce the complexity of the process of calculating the thermal coefficients of the equations of the dynamics of physical processes in ship steam boilers, a new approximation technique is proposed. The methodology is based on the calculation of the values of the coefficients of the parameters of the dynamic equations describing the physical processes in the ship's steam boilers. The calculation was carried out on the three most frequently used thermal load operating modes of the steam boiler (25 %, 50 %, 75 %). As an example of the dynamics equation, the coefficients for the process of oxygen formation in flue gases during liquid fuel combustion were calculated. The use of the fuzzy algorithm of I. Mamdani in the proposed methodology allows taking into account the nonlinear properties of physical parameters and carrying out their approximation over the entire operating range of the thermal load of ship steam boilers. To implement the fuzzy algorithm of I. Mamdani, fuzzification of boiler load parameters and differential equation coefficients was carried out in the specialized MatLab editor package (Fuzzy Logic Toolbox). The procedure of fuzzification or finding the values of membership functions of fuzzy sets based on the initial data was carried out using triangular functions. The proposed technique demonstrates a high level of adequacy of experimental and theoretical values of heat coefficients during comparative analysis. The graphical interface of the program that implements fuzzy approximation allows you to determine the coefficients of the dynamics equations in all operating modes of the ship's boiler. The methodology allows using the obtained equations in further studies of the properties of marine steam boilers in order to improve their structural, ecological and economic characteristics. It can be noted that the analysis of the equations allows the calculation of the setting parameters of the PID-regulator in the system of automatic control of the "fuel-air" combustion process. And also for further adaptation of the control system of the fuel combustion process at all loading modes of operation of the ship's steam boiler.

Анотація – З метою зниження трудомісткості процесу розрахунку теплових коефіцієнтів рівнянь динаміки фізичних процесів у суднових парових котлах запропоновано нову методику апроксимації.

Методика заснована на розрахунку значень коефіцієнтів параметрів динамічних рівнянь, що описують фізичні процеси в судових парових котлах. Розрахунок був проведений на трьох найбільш часто використовуваних теплових навантажених режимах роботи парового котла (25 %, 50 %, 75 %). Як приклад рівняння динаміки проведено розрахунок коефіцієнтів для процесу утворення кисню в димових газах при горінні рідкого палива. Використання нечіткого алгоритму І. Мамдані у запропонованій методиці дозволяє враховувати нелінійні властивості фізичних параметрів та проводити їх апроксимацію на всьому робочому діапазоні теплового навантаження судових парових котлів. Для реалізації нечіткого алгоритму І. Мамдані у спеціалізованому пакеті MatLab редакторі (Fuzzy Logic Toolbox) була проведена фазифікація параметрів навантаження котла та коефіцієнтів диференціального рівняння. Процедура фазифікації або знаходження значень функцій належності нечітких множин на основі вихідних даних проводилася за допомогою трикутних функцій. Запропонована методика демонструє високий рівень адекватності експериментальних і теоретичних значень теплових коефіцієнтів під час проведення порівняльного аналізу. Графічний інтерфейс програми, яка реалізує нечітку апроксимацію, дозволяє визначити коефіцієнти рівнянь динаміки на всіх робочих режимах роботи судового котла. Методика дозволяє використовувати отримані рівняння у подальших дослідженнях властивостей судових парових котлів з метою покращення їх конструктивних, екологічних та економічних характеристик. Можна відзначити, що аналіз рівнянь дозволяє проводити розрахунок настроювальних параметрів ПІД-регулятора в системі автоматичного керування процесом горіння "палива-повітря". А також для подальшої адаптації системи управління процесом горіння палива на всіх навантажувальних режимах роботи судового парового котла.

РЕФЕРАТИ

УДК 621.431.74

Горб С.І., Поповський О.Ю., Будуров М.І. Оптимізація налаштування регулятора частоти обертання дизель-генератора // Автоматизація суднових технічних засобів: наук.-техн. зб. – 2023. – Вип. 28. – Одеса: НУ "ОМА". – С. 3 – 16. DOI: 10.31653/1819-3293-2023-1-28-3-16

Табл. 2. Іл. 8. Список літ.: 8 назв.

Обґрунтовано модель для аналізу динаміки системи автоматичного регулювання частоти обертання дизель-генератора під час ступінчастих змін навантаження. Показано, що через нелінійність ізодромний регулятор частоти обертання по-різному реагує на обурення різної величини. У зв'язку з цим розроблено рекомендації щодо вибору параметрів налаштування ізодромного регулятора у складі дизель-генераторної установки на найбільш імовірних режимах експлуатації.

Ключові слова: дизель-генератор; регулятор частоти обертання; система автоматичного регулювання частоти обертання; іздром; нелінійний зворотний зв'язок; ступінчасте навантаження; математичне моделювання.

Tab. 2. Fig. 8. Refer: 8.

The model for analyzing the dynamics of the automatic speed control system of the diesel generator during stepped load changes is substantiated. It is shown that due to nonlinearity, the isodromic speed governor reacts differently to disturbances of different magnitudes. In this regard, recommendations for choosing the setting parameters of the isodromic governor as part of a diesel generator set on the most likely operating modes are developed.

Keywords: diesel generator; speed governor; automatic speed control system; isodrome; non-linear feedback; stepped load changes; mathematical modeling.

УДК 629.12

Зайцев В.В., Зайцев Вал.В., Зайцев Д.В. Прогнозирование расходов воздуха в подъемном комплексе амфибийных судов на воздушной подушке в штатных режимах их эксплуатации // Автоматизація суднових технічних засобів: наук.-техн. зб. – 2023. – Вип. 28. – Одеса: НУ "ОМА". – С. 17 – 29. DOI: 10.31653/1819-3293-2023-1-28-17-29

Ил. 4. Список лит.: 8 назв.

Предложена методика прогнозирования расходов воздуха в подъемном комплексе (ПК) амфибийных судов на воздушной подушке (СВПА) с помощью имитационного моделирования его работы в штатных режимах их эксплуатации и исследования мореходных качеств. Рассмотрено прогнозирование работы подъемного комплекса автомобильно-пассажирского паромы (АПП) на воздушной подушке амфибийного типа "Марал". Система

дифференциальных уравнений неразрывности расходов воздуха в ПК АПП "Марал" определяет его состояние в каждый момент времени. Приводится функция для вычисления плотности воздуха от его избыточного давления, а также функция вычисления избыточного давления воздуха от его плотности. Представленная математическая модель, воплощенная в программу, позволяет углубленно анализировать динамику и мореходные качества СВПА до завершения их проектирования и до начала постройки. Разработан алгоритм прогнозирования расходов воздуха в ПК СВПА в штатных режимах их эксплуатации и исследования мореходных качеств.

Ключевые слова: амфибийное судно на воздушной подушке, подъемный комплекс, гибкое ограждение, расход воздуха, штатный режим эксплуатации, имитационное моделирование.

Fig. 4. Refer: 8.

A method for predicting air flow in the lifting complex (LC) of hovercraft using simulation modeling of its operation in normal modes of their operation and the study of seaworthiness is proposed. The forecasting of the operation of the lifting complex of an amphibious Car-Passenger Ferry (CPF) on an air cushion of the "Maral" type is considered. The system of differential equations for the continuity of air flow rates in the "Maral" determine its state at each moment of time. A function for calculating the air density from its excess pressure, as well as a function for calculating the excess air pressure from its density, is given. The presented mathematical model, embodied in the program, allows in-depth analysis of the dynamics and seaworthiness of hovercrafts before the completion of their design and before the start of construction. An algorithm has been developed for predicting air flow in the hovercraft lifting complex in normal modes of their operation and studying seaworthiness.

Keywords: hovercraft, lifting complex, flexible skirt, air consumption, normal operating mode, simulation modeling.

УДК 613.165 – 614.7

Карпілов О.Ю. Пристрій для контролю ультрафіолетового випромінювання // Автоматизация судовых технических засобів: наук.-техн. зб. – 2023. – Вип. 28. – Одеса: НУ "ОМА". – С. 30 – 38. DOI: 10.31653/1819-3293-2023-1-28-30-38

Л. 1. Список літ.: 9 назв.

Ультрафіолетове випромінювання (УФВ) є одним з головних фізичних факторів, що визначають плин життєвих процесів. Поряд з головним джерелом УФВ – Сонцем, у різноманітних сферах життєдіяльності людини застосовуються штучні джерела УФВ, що відрізняються за спектральним складом та потужністю. УФВ є підґрунтям для багатьох біологічних процесів у організмах людей та тварин, що обумовлює актуальність досліджень в галузі створення вимірювальних перетворювачів, що забезпечують отримання достовірної інформації. Другим чинником, що сприяє розробці та впровадженню вимірювальних перетворювачів цього класу, є збільшення УФВ

в діапазоні 0,280 ... 0,315 мкм в наслідок деструкції озонового шару Землі.

Ключові слова: Ультрафіолетове випромінювання, вимірювальні перетворювачі, волоконно-оптичні елементи, світловод, піранометр, оптичні та п'єзоелектричні елементи.

Fig. 1. Refer: 9.

Ultraviolet radiation (UVR) is one of the main physical factors that determine the course of life processes. Along with the main source of UVA, the Sun, artificial sources of UVA are used in various areas of human activity, differing in spectral composition and power. UVB is the basis for many biological processes in human and animal organisms, which makes research in the field of developing measuring transducers that provide reliable information relevant. The second factor that contributes to the development and implementation of measuring transducers of this class is the increase in UVB in the range of 0.280 ... 0.315 μm due to the destruction of the Earth's ozone layer.

Key words: Ultraviolet radiation, measuring transducers, fiber-optic elements, light guide, pyranometer, optical and piezoelectric elements.

УДК 621.824.539.4

Кобзарук О.В., Бабінець В.І., Опарін А.В., Смажило Б.В. Технологія протикорозійного захисту поверхонь між шийками суднових гребних валів // Автоматизація суднових технічних засобів: наук.-техн. зб. – 2023. – Вип. 28. – Одеса: НУ "ОМА". – С. 39 – 51. DOI: 10.31653/1819-3293-2023-1-28-39-51

Табл. 4. Лл. 4. Список літ.: 13 назв.

Пропонується технологія захисту від корозійно-механічного пошкодження поверхонь суднових гребних валів в проміжках між робочими шийками ізоляційною стрічкою, що термоусаджується. Проведені випробування фізико-механічних властивостей захисного матеріалу, його водопоглинання та стійкості до корозійно-біологічного впливу морської води. Корозійно-втомні випробування дослідних зразків з покриттям та без нього здійснено у природній морській воді на базі $50 \cdot 10^6$ циклів. Дослідженнями показана висока надійність захисту неробочих шийок суднових гребних валів від корозійно-втомних пошкоджень в морській воді. Технологія захисту опробована на судноремонтних підприємствах та схвалена класифікаційним товариством.

Ключові слова: судновий гребний вал, захист від корозії, ізоляційна стрічка, що термоусаджується.

Tabl. 4. Fig. 4. Refer.: 13.

The technology of protection against corrosion-mechanical damage to the surfaces of ship propeller shafts between its working necks with a heat-shrinkable insulating tape is presented. The physical and mechanical properties of the protective material, its water absorption, and resistance to the corrosion and biological effects

of sea water were tested. Corrosion-fatigue tests of prototypes in seawater were carried out based on $50 \cdot 10^6$ cycles. Tests have shown the high reliability of protection of non-working journals of marine propeller shafts from corrosion-fatigue damage in seawater. The protection technology was tested at shipyards and approved by classification society.

Key words: Marine propeller shaft, corrosion protection, heat-shrinkable insulating tape.

УДК 629.5

Мадей В.В., Волков О.М., Сагін С.С. Корегування навігаційного переходу під час забезпечення екологічних показників роботи суднових дизелів // Автоматизація суднових технічних засобів: наук.-техн. зб. – 2023. – Вип. 28. – Одеса: НУ "ОМА". – С. 52 – 66. DOI: 10.31653/1819-3293-2023-1-28-52-66

Табл. 2. Іл. 1. Список літ.: 31 назв.

Розглянута можливість корегування навігаційного переходу судна класу General Cargo дедвейтом 10820 т між портами Бразилії та Карибського басейну з урахуванням забезпечення постійної роботи суднових чотиритактних дизелів 5DC-17A фірми Daihatsu Diesel на суміші моторного палива та біопалива. Експериментально доведено, що при цьому підвищується екологічність роботи суднових дизелів.

Ключові слова: біопаливо, екологічні показники, моторне паливо, навігаційний перехід, паливна суміш, чотиритактний дизель.

Tabl. 2. Fig. 1. Refer.: 31.

The possibility of correction the navigation passage of a General Cargo class ship with a deadweight of 10,820 tons between the ports of Brazil and the Caribbean basin was considered, taking into account the constant operation of the ship's four-stroke diesel 5DC-17A of the Daihatsu Diesel company on a mixture of motor fuel and biofuel. It has been experimentally confirmed that this increases the environmental friendliness of the operation of marine diesel engines.

Key words: biofuel, environmental indicators, four-stroke diesel, fuel mixture, motor fuel, navigation passage.

УДК 629.5

Сагін А.С. Корегування налаштування паливної апаратури високого тиску під час переведення суднових дизелів на паливо з низьким вмістом сірки // Автоматизація суднових технічних засобів: наук.-техн. зб. – 2023. – Вип. 28. – Одеса: НУ "ОМА". – С. 67 – 78. DOI: 10.31653/1819-3293-2023-1-28-67-78

Табл. 3. Іл. 2. Список літ.: 30 назв.

Надані результати щодо корегування налаштування паливних насосів високого тиску суднового дизеля 6S60MC-8.2-ТІІ під час його експлуатації в

спеціальних екологічних районах Sulfur Emission Control Areas на паливі з низьким вмістом сірки. Експериментально підтверджено, що шляхом зменшення кута випередження подачі палива досягається зниження динамічних навантажень на деталі кривошипно-шатунного механізму та зменшення пікових температур в циліндрі дизеля. Це виявляється в зменшенні ступеню підвищення тиску під час згоряння та зниженні емісії оксидів азоту.

Ключові слова: емісії оксидів азоту, кут випередження подачі палива, паливний насос високого тиску, середній індикаторний тиск, ступінь підвищення тиску під час згоряння, судновий дизель, температура випускних газів.

Tabl. 3. Fig. 2. Refer.: 30.

The results are presented on adjusting the setting of the high pressure fuel pumps of the 6S60MC-8.2-II marine diesel engine during its operation in special environmental areas of Sulfur Emission Control Areas on low-sulfur fuel. It has been experimentally confirmed that by reducing the advance angle of fuel supply, a reduction in dynamic loads on the parts of the crank-connecting mechanism and a reduction in peak temperatures in the diesel cylinder is achieved. This is manifested in a decrease in the degree of pressure increase during combustion and a decrease in the emission of nitrogen oxides.

Key words: degree of pressure increase during combustion, emissions of nitrogen oxides, exhaust gas temperature, fuel advance angle, high-pressure fuel pump, mean indicator pressure, marine diesel.

УДК 681.518.5:681.586.5

Сандлер А.К. Застосування альтернативних скломатеріалів для датчиків деформації та вібрації елементів пропульсивного комплексу // Автоматизація суднових технічних засобів: наук.-техн. зб. – 2023. – Вип. 28. – Одеса: НУ "ОМА". – С. 79 – 89. DOI: 10.31653/1819-3293-2023-1-28-79-89

Табл. 4. Іл. 4. Список літ.: 30 назв.

Оґрунтовано застосування альтернативних видів скломатеріалів для створення волоконно-оптичних датчиків вібрації та деформації для здійснення діагностування елементів пропульсивного комплексу. Показано, що найбільш доцільним є застосування штучного сапфіру для виготовлення чутливих елементів датчиків. Застосування чутливих елементів фулеренового скла не надає суттєвих переваг аналогічними сапфіровими та вимагає більш ретельного захисту. Технологічні особливості виробництва та вартість штучного діаманту виправдовує його застосування лише у виключних випадках.

Ключові слова: пропульсивний комплекс, вібрація, підшипникові опори, волоконно-оптичний датчик.

Tabl. 4. Fig. 4. Refer.: 30.

The paper substantiates the use of alternative types of glass materials for the creation of fiber-optic vibration and strain sensors for diagnosing elements of the propulsion complex. It is shown that the most appropriate is the use of artificial sapphire for the manufacture of sensitive sensor elements. The use of fullerene glass sensing elements does not provide significant advantages over similar sapphire elements and requires more careful protection. The technological features of production and the cost of artificial diamond justify its use only in exceptional cases.

Key words: propulsion complex, vibration, bearing supports, fiber optic sensor.

УДК 629.5

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

Табл. 4. Іл. 4. Список літ.: 30 назв.

Наведені результати досліджень, щодо забезпечення режимів мащення суднових чотиритактних дизелів. Випробування виконувались на дизелях 6L23/30 MAN-Diesel&Turbo, які в кількості трьох одиниць входили до складу допоміжної енергетичної установки судна класу Bulk Carrier дедрейтом 37620 т. Умови роботи моторного мастила, що використовувалось в циркуляційній системі мащення двох дизелів змінювались шляхом нанесення на поверхні вкладишів підшипників органічних покриттів та додавання до обсягу мастила поверхнево-активної речовини. Експериментально доведено, що при цьому підвищується енергетичні показники роботи дизеля та знижується швидкість окислення мастила.

Ключові слова: енергетичні показники дизеля, загальне лужне число, моторне мастило, структурні показники мастила, судновий чотиритактний дизель, циркуляційна система мащення.

Tabl. 4. Fig. 4. Refer.: 30.

The results of research on ensuring the lubrication regimes of marine four-stroke diesel engines are presented. The tests were performed on 6L23/30 MAN-Diesel&Turbo diesel engines, which in the amount of three units were part of the auxiliary power plant of the Bulk Carrier class vessel with a deadweight of 37,620 tons. The operating conditions of the engine lubricant used in the circulating lubrication system of two diesel engines were changed by applying organic coatings to the surface of the bearing liners and adding a surface-active substance to the volume of the lubricant. It has been experimentally proven that this increases the energy performance of the diesel engine and decreases the rate of oxidation of the motor oil.

Key words: circulating lubrication system, diesel power indicators, engine oil, marine four-stroke diesel engine, structural oil indicators, total base number.

УДК 665.765:62-122

Levinskyi Maksym 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

Fig. 13. Refer: 15.

Quality of a marine 4-stroke diesel generator engine oil is crucial for ensuring the reliable operation of these engines, which are essential for marine transportation and industry. Traditional methods of oil quality diagnostics can be time-consuming and require manual labour, which can lead to inaccuracies and delays. This work presents an analysis of ways of automatically diagnosing the quality of a marine 4-stroke diesel generator engine oil. The approaches involve using different algorithms to analyse data from various sensors and indicators in the engine, and to give engine operator suggestions if needed for necessary action. Data from a marine 4-stroke diesel generator engine is being collected under different operating conditions, and is being used to draw a conclusion regarding the current condition of the oil. Automatic diagnostic approach is accurate and efficient, and can provide real-time diagnostics of the engine oil quality. By utilizing automatic diagnostic one can potentially save time and reduce costs for engine operators and manufacturers, while also improving the overall reliability and safety of marine transportation and industry.

Keywords: automatic diagnostic, lubrication, lubricating oil, diesel generator, condition.

Лл. 13. Список літ.: 15 назв.

Якість масла для чотиритактного дизель-генератора морських суден є вирішальною для забезпечення надійної роботи цих двигунів, які є необхідними для морського транспорту та промисловості. Традиційні методи діагностики якості масла можуть забирати багато часу та потребувати ручної праці вахтового механіка, що може призвести до неточностей та затримок, не кажучи про те, що частота проведення таких тестів є недостатньою для того, щоб оперативно визначити швидку зміну якості масла через забруднення. Ця робота презентує аналіз методів автоматичної діагностики якості масла для чотиритактного дизельного генератора морського судна. Підходи полягають у використанні різних алгоритмів для аналізу даних з різних датчиків та індикаторів в двигуні, та в наданні рекомендацій для необхідних дій оператору двигуна, якщо це потрібно. Дані з чотиритактного дизель-генератора морського судна збираються в різних умовах експлуатації та використовуються для встановлення поточного стану масла. Підхід автоматичної діагностики є точним та ефективним, та може забезпечувати виявлення якості масла в реальному часі. Використання автоматичної діагностики може потенційно заощадити час та зменшити витрати для операторів та виробників двигунів, покращуючи загальну надійність та безпеку морського транспорту та промисловості.

Ключові слова: автоматична діагностика, зміщення, мастило, дизель-генератор, стан.

UDC 629.12.056

Mikhailenko Vladislav Sergeevich, Kharchenko Roman Yurievich, Leshchenko Valery Vladislavovich Fuzzy method of approximating values of parameters of dynamic models of ship boilers // Автоматизація суднових технічних засобів: наук.-техн. зб. – 2023. – Вип. 28. – Одеса: НУ "ОМА". – С. 121 – 131. DOI: 10.31653/1819-3293-2023-1-28-121-131

Tab. 2. Fig. 8. Refer: 8.

In order to reduce the complexity of the process of calculating the thermal coefficients of the equations of the dynamics of physical processes in ship steam boilers, a new approximation technique is proposed. The methodology is based on the calculation of the values of the coefficients of the parameters of the dynamic equations describing the physical processes in the ship's steam boilers. The calculation was carried out on the three most frequently used thermal load operating modes of the steam boiler (25 %, 50 %, 75 %). As an example of the dynamics equation, the coefficients for the process of oxygen formation in flue gases during liquid fuel combustion were calculated. The use of the fuzzy algorithm of I. Mamdani in the proposed methodology allows taking into account the nonlinear properties of physical parameters and carrying out their approximation over the entire operating range of the thermal load of ship steam boilers. To implement the fuzzy algorithm of I. Mamdani, fuzzification of boiler load parameters and differential equation coefficients was carried out in the specialized MatLab editor package (Fuzzy Logic Toolbox). The procedure of fuzzification or finding the values of membership functions of fuzzy sets based on the initial data was carried out using triangular functions. The proposed technique demonstrates a high level of adequacy of experimental and theoretical values of heat coefficients during comparative analysis. The graphical interface of the program that implements fuzzy approximation allows you to determine the coefficients of the dynamics equations in all operating modes of the ship's boiler. The methodology allows using the obtained equations in further studies of the properties of marine steam boilers in order to improve their structural, ecological and economic characteristics. It can be noted that the analysis of the equations allows the calculation of the setting parameters of the PID - regulator in the system of automatic control of the "fuel - air" combustion process. And also for further adaptation of the control system of the fuel combustion process at all loading modes of operation of the ship's steam boiler.

Keywords: ship steam boiler; mathematical model; unclear methodology; approximation.

Табл. 2. Іл. 8. Список літ.: 8 назв.

З метою зниження трудомісткості процесу розрахунку теплових коефіцієнтів рівнянь динаміки фізичних процесів у суднових парових котлах

запропоновано нову методику апроксимації. Методика заснована на розрахунку значень коефіцієнтів параметрів динамічних рівнянь, що описують фізичні процеси в суднових парових котлах. Розрахунок був проведений на трьох найбільш часто використовуваних теплових навантажених режимах роботи парового котла (25 %, 50 %, 75 %). Як приклад рівняння динаміки проведено розрахунок коефіцієнтів для процесу утворення кисню в димових газах при горінні рідкого палива. Використання нечіткого алгоритму І. Мамдані у запропонованій методиці дозволяє враховувати нелінійні властивості фізичних параметрів та проводити їх апроксимацію на всьому робочому діапазоні теплового навантаження суднових парових котлів. Для реалізації нечіткого алгоритму І. Мамдані у спеціалізованому пакеті MatLab редакторі (Fuzzy Logic Toolbox) була проведена фазифікація параметрів навантаження котла та коефіцієнтів диференціального рівняння. Процедура фазифікації або знаходження значень функцій належності нечітких множин на основі вихідних даних проводилася за допомогою трикутних функцій. Запропонована методика демонструє високий рівень адекватності експериментальних і теоретичних значень теплових коефіцієнтів під час проведення порівняльного аналізу. Графічний інтерфейс програми, яка реалізує нечітку апроксимацію, дозволяє визначати коефіцієнти рівнянь динаміки на всіх робочих режимах роботи суднового котла. Методика дозволяє використовувати отримані рівняння у подальших дослідженнях властивостей судових парових котлів з метою покращення їх конструктивних, екологічних та економічних характеристик. Можна відзначити, що аналіз рівнянь дозволяє проводити розрахунок настроювальних параметрів ПД-регулятора в системі автоматичного керування процесом горіння "палива – повітря". А також для подальшої адаптації системи управління процесом горіння палива на всіх навантажувальних режимах роботи суднового парового котла.

Ключові слова: судновий паровий котел; математична модель; нечітка методика; апроксимація.

ЗМІСТ

Горб С.І., Поповський О.Ю., Будуров М.І. Оптимізація налаштування регулятора частоти обертання дизель-генератора...	3
Зайцев В.В., Зайцев Вал.В., Зайцев Д.В. Прогнозирование расходов воздуха в подъемном комплексе амфибийных судов на воздушной подушке в штатных режимах их эксплуатации.....	17
Карпілов О.Ю. Пристрій для контролю ультрафіолетового випромінювання.....	30
Кобзарук О.В., Бабінець В.І., Опарін А.В., Смажило Б.В. Технологія протикорозійного захисту поверхонь між шийками суднових гребних валів.....	39
Мадей В.В., Волков О.М., Сагін С.С. Корегування навігаційного переходу під час забезпечення екологічних показників роботи суднових дизелів.....	52
Сагін А.С. Корегування налаштування паливної апаратури високого тиску під час переведення суднових дизелів на паливо з низьким вмістом сірки.....	67
Сандлер А.К. Застосування альтернативних скломатеріалів для датчиків деформації та вібрації елементів пропульсивного комплексу.....	79
Столярик Т.О. Забезпечення режимів мащення чотиритактних суднових дизелів.....	90
Levinskyi Maksym Automatic diagnostic of marine diesel generator lubricating oil condition.....	106
Mikhailenko Vladislav Sergeevich, Kharchenko Roman Yurievich, Leshchenko Valery Vladislavovich Fuzzy method of approximating values of parameters of dynamic models of ship boilers.....	121
Реферати.....	132

ПРАВИЛА
оформлення та подання рукописів для збірника
"Автоматизація суднових технічних засобів"

1. Рукопис подається в електронному вигляді українською або англійською мовами: текст у форматі *.doc, набраний на аркушах формату А5 кегелем 10, гарнітура Times New Roman. Використання списків у редакторі Word не дозволяється. Рукопис має бути підписаний усіма авторами.

2. Обсяг статті (з ілюстраціями, підмалювальними підписами та резюме українською та англійською мовами) не повинен перевищувати одного авторського листа.

3. На першій сторінці рукопису мають бути рядково вказані: індекс УДК; ПІБ авторів; найменування установи, в якій виконувалася робота; адреси електронної пошти авторів; назва статті; резюме українською та англійською мовами по 500 – 900 символів. Наприкінці рукопису наводиться реферат двома мовами – українською та англійською, – що включає ПІБ авторів, назву статті, кількість таблиць, ілюстрацій та найменувань списку літератури, резюме та ключові слова.

Якщо рукопис не є повністю англійським, він супроводжується анотацією англійською мовою не менше 1800 знаків, включаючи ключові слова. Якщо рукопис не є повністю українським, він супроводжується анотацією українською мовою обсягом не менше 1800 знаків, включаючи ключові слова.

4. Таблиці друкуються в тексті і повинні бути забезпечені заголовками, що пояснюють. Посилання на таблиці даються у скороченому вигляді (таб.).

5. У формулах, літерних позначеннях та індексах латинський шрифт повинен мати нахил (за винятком тригонометричних функцій), а грецький шрифт та кирилиця мають бути набрані прямим шрифтом. Нумеруються лише формули, на які є посилання у тексті. Одиниці фізичних величин повинні відповідати ДСТУ 3651.0-97, ДСТУ 3651.1-97, ДСТУ 3651.2-97 "Метрологія. Одиниці фізичних величин" та мати загальноприйняті позначення.

6. Бібліографічний опис літератури має відповідати ДСТУ ГОСТ 7.1:2006. Бібліографічний опис. Загальні вимоги та правила складання (ГОСТ 7.1–2003).

7. Текст статей має відповідати вимогам постанови Президії ВАК України від 15.01.03 № 7-05/1 "Про підвищення вимог до спеціальних видань, внесених до переліків ВАК України": *«... постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями; аналіз останніх досліджень і публікацій, в яких започатковано розв'язання даної проблеми і на які спирається автор, виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття; формулювання цілей статті (постановка завдання); виклад основного матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів; висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямку»*.

Підписано до друку 30.03.2023.

Формат 60×84 1/16. Папір офсетний №1. Гарнітура Times new Roman.

Ум. піч. л. 8,6. Тираж 50 екз. Замовлення №
"ІздатІнформ" НУ "ОМА"

Свідоцтво ДК №1292 від 20.03.2003

65029, г. Одеса, вул. Дідріхсона, 8, корп. 7, к. 206

Тел./факс: (0482) 34-14-12

publish@onma.edu.ua