

УДК 681.518.5:681.586.5

DOI: 10.31653/1819-3293-2024-1-29-03-12

ARTICLE HISTORY

Received 18.09.2024

Accepted 25.09.2024

Богач Валентин Михайлович<sup>1</sup>, Опришко Марина Олегівна<sup>2</sup>  
НУ "Одеська морська академія", Одеса, Україна  
valent57bog@gmail.com<sup>1</sup>, marinaoprisko67@gmail.com<sup>2</sup>

## Вдосконалення автоматизованого засобу контролю процесу мащення циліндрових втулок

Bogach Valentin<sup>1</sup>, Opryshko Marina<sup>2</sup>  
NU "Odessa Maritime Academy", Odessa, Ukraine  
valent57bog@gmail.com<sup>1</sup>, marinaoprisko67@gmail.com<sup>2</sup>

## Improvement of the automated means of controlling the lubrication process of cylinder bushes

**Резюме.** Обґрунтовано схемотехнічне рішення пристрою контролю мащення поверхонь деталей циліндро-поршневої групи суднових двигунів внутрішнього згоряння. У запропонованому пристрої забезпечена більш адекватне визначення зміни режимів мащення та перетворення параметрів плівки мастила у зміни інформаційного сигналу, а також компенсація впливу дестабілізуючих факторів на вимірювальний канал пристрою.

**Summary.** The schematic and technical solution of the device for controlling the lubrication of the surfaces of parts of the cylinder-piston group of internal combustion marine engines is substantiated. The proposed device provides a more adequate determination of the change in lubrication modes and the transformation of the parameters of the lubricant film into changes in the information signal, as well as compensation for the influence of destabilizing factors on the measuring channel of the device.

Безперервне підвищення потужності суднових двигунів внутрішнього згоряння (СДВЗ) і подальше використання важких та

надважких сортів палива обумовили тенденцію зниження надійності найбільш важливих деталей і вузлів двигунів. Серед вузлів СДВЗ, чия надійність викликає найбільшу занепокоєність, лідируюче місце належить деталям циліндро-поршневої групі (ЦПГ). Аналіз статистичних даних щодо надійності сучасних СДВЗ показує, що ресурс втулки циліндра становить орієнтовно  $3 \dots 4 \cdot 10^3$ , головки поршня –  $2 \dots 3 \cdot 10^3$ , кришки –  $3,5 \dots 4,5 \cdot 10^3$  годин. При чому спостерігається число раптових відмов, які швидко розвиваються, та визначення яких неможливо без новітніх засобів та методів технічного діагностування. У цілому, за останнє десятиріччя характеризується зниженням фактичного ресурсу деталей ЦПГ майже у 1,5 рази. Як наслідок, – загальне збільшення вартості експлуатації й трудомісткості технічного обслуговування та ремонту СДВЗ. Таким чином, розробка ефективних засобів визначення реального технічного стану СДВЗ є актуальним завданням сучасного етапу експлуатації суднових енергетичних установок і дизелебудування.

Вірогідна інформація про реальний технічний стан СДВЗ, а саме – інформація про наявність зношування деталей ЦПГ, дає змогу впливати на його інтенсивність і, таким чином, управляти їм, а, отже, управляти технічним станом двигуна в цілому [1 - 3].

На сучасних суднах проводиться моніторинг стану й функціонування окремих відповідальних деталей ЦПГ. Спеціальний швидкодіючий датчик, установлений вище продувних вікон на циліндровій втулці двигуна, вимірює частоту й амплітуду акустичних коливань, що виникають при проходженні кільця повз датчик по суцільній поверхні втулки й гідродинамічних умови мащення. На підставі цієї інформації встановлюється працездатний стан сполучення "кільце-втулка". Однак, при малих швидкостях руху поршня, у момент проходження продувних вікон втулок, умови мащення погіршуються через продувку й, режим змащення вже не є гідродинамічним. Товщина плівки зменшується, у тонкому мастильному шарі виникають анізотропні властивості, що змінюють природу взаємодії "кільце-втулка" за рахунок розклинюючого тиску, що перешкоджає виникненню адгезійного контакту. Розклинюючий тиску циліндрового мастила на сталях і чавунах носять експонентний характер. Максимальне значення розклинюючого тиску, що виникає в тонкій плівці циліндрового мащення складає: для чавунного кільця дорівнює 140 кПа; на сталі 45 ... 40 кПа; на сталі 35ХМА – 2,49 кПа. Мінімальна товщина плівок шару мащення, при якій розклинюючий тиск досягає

максимуму для всіх досліджених матеріалів лежить в інтервалі 140 ... 160 нм. Поршневе кільце зберігає працездатний стан при товщини плівки мащення, що й виключає контакт між сполученими поверхнями, при її значенні більш 140 нм [4].

Дані, отримані у результаті впровадження методу ідентифікації й спосіб діагностики технічного стану поршневих кілець СДВЗ за частотою акустичного сигналу при русі кілець уздовж продувних вікон втулки, дозволили дійти таких висновків.

До більш детального розуміння ефективних коефіцієнтів в'язкості й щільності мастильного шару можна прийти в результаті аналізу завдання про рух важкої частки в середовищі, яке коливається, з опором типу сухого тертя. При вібрації тертя трансформується (відносно повільних рухів) у нелінійно-в'язке. Причому частка, яка при відсутності вібрації або знаходилася у стані спокою або падала (спливала) прискорено, буде спливати з постійною середньою швидкістю, яка визначається з рівняння  $m_0(\Delta - 1)g = W(V_z)$ , а саме

$$V_z = r\omega\delta_1 \sqrt{\left[ \frac{m_0(\Delta-1)}{m_1\sqrt{1-\delta_1^2}} \right]^2 - \left[ \frac{F_h}{m_1r\omega^2} \right]^2} \approx \frac{\delta_1}{\sqrt{1-\delta_1^2}} \frac{m_0}{m_1} (\Delta-1)r\omega, \quad (1)$$

де  $\delta_1 = m_0(\Delta - 1)g/F_v$ ;  $m_0$  – маса середовища в об'ємі, який дорівнює об'єму частки;  $\Delta = \rho^*/\rho$  – співвідношення середніх щільностей частки та середовища;  $g$  – прискорення вільного падіння;  $W$  – вібраційна сила.

Якщо зіставити значення  $V$  за (1) з виразом для швидкості вільного падіння сферичної частки у звичайній в'язкої рідині при малих числах Рейнольдса та  $V_z = m_0(\Delta - 1)g / 3\pi\mu d$  ( $\mu$  – коефіцієнт в'язкості рідини,  $d$  – діаметр частки), то значення ефективного коефіцієнта в'язкості (коефіцієнта вібров'язкості) можливо визначити як:

$$\mu^* = \frac{F_v\sqrt{1-\delta^2}}{3\pi dR\omega} = \frac{F_v(3\pi dr\omega)^{-1}}{\sqrt{\left[ \frac{m_0(\Delta-1)}{m_1(\sqrt{1-\delta^2})} \right]^2 - \left[ \frac{F_h}{m_1r\omega^2} \right]^2}}. \quad (2)$$

Ефективні щільність і в'язкість середовища доцільно застосовувати при аналізі як лінійних, так і нелінійних коливань тіл в'язкої рідини, а також при розгляді коливань ємностей із зазначеною суспензією. У цьому випадку ефективна щільність  $\rho^*$  визначається як:

$$\frac{\rho^*}{\rho} = 1 + s(\Delta - 1) \left[ 1 - \frac{\Delta - 1}{\Lambda(\alpha)} \left( \Delta + 0,5 + \frac{9}{4\alpha} \right) \right], \quad (3)$$

де  $\Delta = \rho^*/\rho$ ;  $\alpha = r_0(\omega\rho/2\mu)^{0,5}$ ;  $\Lambda(\alpha) = \Delta^2 + \Delta(1 + 4,5\alpha) + 0,25 + 81/16\alpha^4(1 + 2\alpha + 2\alpha^2 + 4/9\alpha^3)$ ;  $\rho$  – щільність рідини;  $\rho_1$  – щільність часток;  $r_0$  – їх радіус;  $s$  – об'ємна концентрація твердих часток, передбачувана щодо малої;  $\mu$  – коефіцієнт в'язкості рідини;  $\omega$  – частота коливань.

Ефективна щільність  $\rho^*$  завжди менше середньої щільності суміші  $\rho_m = \rho[1 + s(\Delta - 1)]$ . Це пояснюється тим, що більш щільні тверді частки здійснюють абсолютні коливання, менші по амплітуді, чим коливання самої рідини. Напроти, ефективна в'язкість виявляється завжди більшою, ніж в'язкість чистої рідини, внаслідок відносних коливань часток у рідині [5].

Якщо у (1 - 3) застосувати дійсні параметри величин, які отримані у [4], то можливо дійти такого висновку. Режим рідинного гідродинамічного тертя супроводжується генерацією шаром мащення вібраційних коливань у високочастотній області. При переході до режиму піврідинного гідродинамічного тертя і далі, спектр вібраційних коливань зсувається у середньо- та низькочастотну області.

Сучасні засоби технічного діагностування деталей ЦПГ функціонують в умовах концентрованого впливу потужних електромагнітних і термічних полів, під дією зовнішніх вібрацій, які створюються судновим енергетичним встаткуванням. Саме ці збурення не дозволяють забезпечити ефективну, відповідну сучасним експлуатаційним вимогам, діагностику і прогнозування технічного стану деталей ЦПГ за головною діагностичною ознакою – вібраціями у найбільш інформативному високочастотному діапазоні.

Аналіз відомих рішень доводить, що для сучасної технічної експлуатації і ремонту ЦПГ затребувані новітні засоби діагностування та прогнозування технічного стану, які є інваріантними до більшості експлуатаційних дестабілізуючих факторів [6].

Відомий пристрій, що складається з герметичного корпусу з основою та світловода з консольно закріпленням на ньому дзеркалом [7 - 9].

Використання дзеркала, консольно закріпленого на світловоді, обумовлює такі недоліки вказаного пристрою:

неможливість компенсації впливу негативних дестабілізуючих факторів, таких як підвищена температура;

створення комплексом "світловод-консоль-дзеркало" додаткових власних коливань, які можуть бути паразитними по відношенню до коливань, що створюються контрольованою поверхнею;

необхідність періодичного очищення оптичних поверхонь відкритого оптичного каналу.

Більшою мірою відповідає задачам контролю процесу мащення деталей ЦПП є пристрій, який складається з блока живлення та обробки інформації, джерела та приймача випромінювання, герметичного корпусу з основою, світловода та дзеркала, та у якому для компенсації температурного впливу застосовано біскляне дзеркало, що консольно закріплено на основі [10].

Але і цей пристрій не вільний від такого недоліку як створення комплексом "світловод-консоль-дзеркало" додаткових власних коливань, які можуть бути паразитними по відношенню до коливань, що створюються контрольованою поверхнею. Крім того, при застосуванні пристрою, існує необхідність періодичного очищення оптичних поверхонь відкритого оптичного каналу.

Таким чином, невідкладним є розв'язання завдання щодо створення пристрою, у якому підвищена захищеність елементів від неконтрольованих експлуатаційних факторів, відсутня необхідність періодичного очищення оптичних поверхонь відкритого оптичного каналу та одночасно збережені високий рівень чутливості та швидкодія волоконних пристроїв відомих типів.

На підставі проведених досліджень запропоновано технічне рішення волоконно-оптичного пристрою контролю мащення циліндрових втулок, що складається з блока живлення та обробки інформації, джерела та приймача випромінювання, герметичного корпусу з основою та світловода. Головна відмінність від існуючих аналогів полягає у тому, що до складу датчику залучено біскляний світловод, який утворює світловодну котушку з віддзеркалюючим шаром та інерційною масою на одному з кінців. Окрім котушки до складу пристрою залучені двобічний оптичний розгалужувач з оптичними фільтрами у кожній гілці, а також підсилювач сигналу та фільтр високих частот (рис).

Випромінювання від джерела 2 надходить до двобічного оптичного розгалужувача 3. Кожна гілка розгалужувача містить оптичні фільтри, які формують випромінювання зі своєю довжиною хвилі. Гілки розгалужувача сполучені з одним з кінців світловодної котушки 6 з біскляного світловоду, яка міститься у герметичному корпусі 5 з основою. Інший кінець світловодної котушки 6 з біскляного світловоду має віддзеркалюючий шар 8, та сполучений з інерційною масою 7. Випромінювання після відбиття від віддзеркалюючого шару повертається через відповідні гілки двобічного оптичного розгалужувача до приймача випромінювання 9.

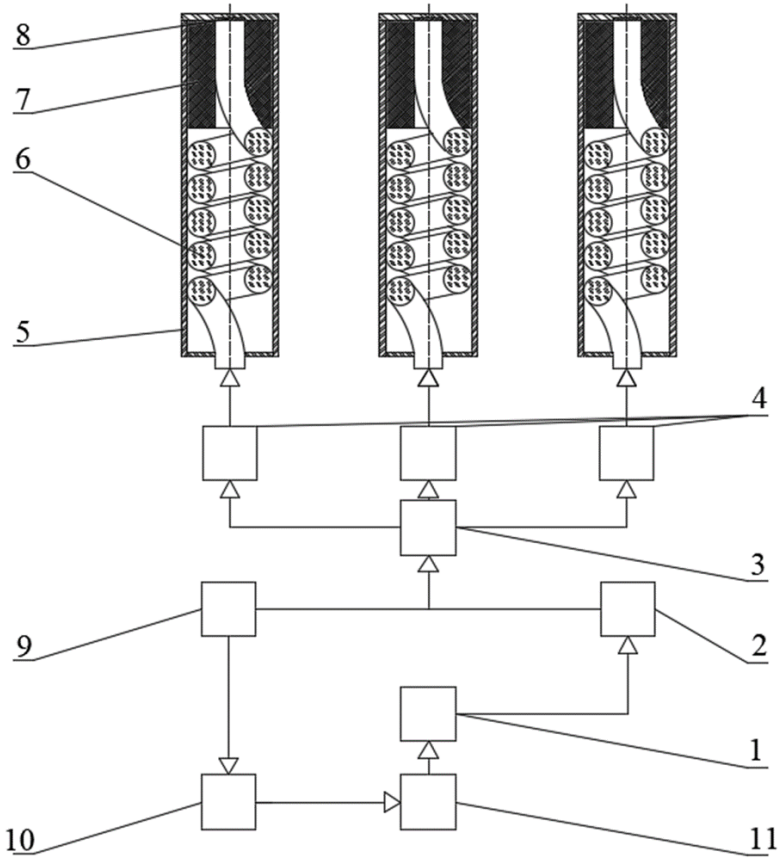


Рис. Волоконно-оптичний пристрій контролю мащення циліндрових втулок: 1 – блок живлення та обробки інформації; 2 – джерело випромінювання; 3 – двобічний оптичний розгалужувач; 4 – оптичні фільтри; 5 – герметичний корпус з основою; 6 – світловодна котушка з біскляного світловоду; 7 – інерційна маса; 8 – віддзеркалюючий шар; 9 – приймач випромінювання; 10 – підсилювач; 11 – фільтр високих частот

Електричний сигнал, який генерується у приймачі підсилюється підсилювачем 10. Після чого надходить через фільтр високих частот 11 до блоку живлення та обробки інформації 1.

Корпуси із світловодними котушками фіксуються на зовнішньому боці циліндровою втулки уздовж лінії трибологічного контакту втулки та поршневих кілець.

У статичному режимі (двигун, який контролюється не працює), у елементах датчику відбувається зменшення інтенсивності оптичного випромінювання, що проходить скрізь них, яке обумовлене тільки впливом дестабілізуючих неконтрольованих факторів. У цьому режимі, під впливом температури, змінюється геометрія котушки з біскляного світловода. Зміна радіусу вигину витків котушки викликає зміни умови модуляції опорного випромінювання пропорційно впливу зовнішніх факторів. Зафіксовані зміни враховуються в подальшому як відповідні поправки.

У динамічному режимі (двигун, поверхні якого контролюються, у робочому режимі) під впливом вібрації відбувається рух інерційної маси, який перетворюється на зміни умови модуляції опорного випромінювання у котушки з біскляного світловода пропорційно до величині вимірюваної вібрації у трибологічному контакті контрольованої поверхні.

Під впливом механічних коливань, які генеруються у наслідок трибологічного контакту між дзеркалом поверхні циліндрової втулки, шаром мащення та поршневими кільцями, виникають високочастотні механічні коливання. Коливання сприймаються інерційною масою, яка вільно пересувається у герметичному корпусі та спричиняє деформації стиску у світловодній котушці з біскляного світловода. Деформації світловодної котушки викликають модуляцію опорного світлового випромінювання, яке надходить від джерела до котушки з віддзеркалюючим шаром та у зворотному порядку до приймача випромінювання [11, 12].

Під впливом температури біскляний світловод змінює свою геометрію та відповідно умови модуляції опорного випромінювання. Таким чином відбувається компенсація неконтрольованих дестабілізуючих факторів [13, 14].

Подальша обробка величини інтенсивності випромінювання, що надходить до приймача випромінювання, після його підсилення та фільтрації, дозволить отримати електричний сигнал, який буде адекватний умовам мащення у трибологічному контакті, та в якому буде компенсована паразитна складова від впливу дестабілізуючих факторів.

Застосування котушки з біскляного світловоду відповідної жорсткості у сполученні з інерційною масою дозволить більш адекватно оцінювати перетворення параметрів вібрації трибологічного контакту

у зміни інформаційного сигналу. В додаток використання біскляного світловоду забезпечить компенсацію впливу дестабілізуючих факторів на вимірювальний канал пристрою. Термостійкі компоненти біскляного світловоду дозволять максимально наблизити пристрій до джерела виникнення вібрації у контрольованих точках трибологічного контакту [15]. А перехід до закритого оптичного каналу пристрою виключить підвищення якості функціонування за рахунок переходу до закритого оптичного каналу виключить необхідність періодичного очищення відкритих оптичних поверхонь.

Таким чином буде здійснена інваріантність пристрою до дестабілізуючих факторів та реалізована можливість застосування в спеціальних умовах експлуатації у межах єдиної інформаційно-вимірювальної мережі з пристроїв на основі волоконно-оптичних технологій [16 – 18].

#### ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

1. Богач, В. М. Прогнозирование условий маслоподачи в цилиндры судовых дизелей // Судовые энергетические установки. – 2006. – Вып. 15. – С. 10 - 16.
2. Богач, В. М., Шебанов, А. Н., Колиев, И. Д. Истечение масла из смещенных каналов в цилиндры длинноходовых СДВС // Судовые энергетические установки. – 2006. – Вып. 17. – С. 38 - 46.
3. Богач, В. М., Шебанов, А. Н., Колиев, И. Д., Журавлев, Ю. И. Эксплуатационные показатели эффективности лубрикаторных систем судовых дизелей // Судовые энергетические установки. – 2007. – Вып. 19. – С. 10 - 22.
4. Слободянюк, Д. И. Совершенствование методики идентификации состояния поршневых колец МОД на основе экспериментального исследования частоты акустического сигнала // Проблемы техники. – 2012. – № 3. – С. 68 - 75.
5. Вибрации в технике: в 6 т. / Машиностроение. – М., 1979. – Т.2: Колебания нелинейных механических систем. – 351 с.
6. 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 / Київський університет інфраструктури та технологій. – К., 2021. – 20 с.
7. Моек, Е., Штрикерт, Х. Техническая диагностика судовых машин и механизмов. – Л.: Судостроение, 1986. – 232 с.



8. Pinet, Éric Temperature fiber-optic point sensors: Commercial technologies and industrial application / Eric Pinet, Sébastien Ellyson, Frédéric Borne // MIDEEM Conference 2010. – P. 31 - 43.

9. Кузнецов, А. А., Морозов, О. Г., Нуреев, И. И., Фархутдинов, Л. М., Артемьев, В. И. Датчик износа и температуры изделия на основе волоконно-оптического чувствительного элемента / А. А. Кузнецов, О. Г. Морозов, И. И. Нуреев, Л. М. Фасхутдинов, В. И. Артемьев // Известия СНЦ, – 2015. – Т. 17. – № 6 (2). – С. 455 - 460.

10. Патент України № 146258. МПК (2006) G01M 11/08 (2006.01), G02B 6/00. Волоконно-оптичний датчик зношування / А. К. Сандлер, М. О. Опришко, Г. О. Кузнецова; заявник та володар патенту Національний університет "Одеська морська академія". – u202005716. – заявл. 04.09.2020; опубл. 03.02.2021, бюл. № 5/2021. – 3 с.

11. Гуляев, Ю. В., Меш, М. Я., Проклов, В. В. Модуляционные эффекты в волоконных световодах и их применение. – М.: Радио и связь, 1991. – 152 с.

12. Снайдер, А., Лав, Д. Теория оптических волноводов. – М.: Радио и связь, 1987. – 656 с.

13. Температурный коэффициент линейного расширения стекла при различных температурах. Электронный ресурс. Режим доступа: <http://thermalinfo.ru/svoystva-materialov/keramika-i-steklo/temperaturnyj-koeffitsient-linejnogo-rasshireniya-stekla-pri-razlichnyh-temperaturah>.

14. Сандлер, А. К., Логишев, И. В., Сандлер, А. А. Инвариантный волоконный акселерометр // Энергетика судна: експлуатація та ремонт: матеріали науково-технічної конференції. – Одеса: ОНМА. – 2011. – С. 277 - 279.

15. Сандлер, А. К. Застосування альтернативних скломатеріалів для датчиків деформації та вібрації елементів пропульсивного комплексу // Автоматизація суднових технічних засобів. – 2023. – Вып. 28. – Одесса: НУ "ОМА". – С. 79 – 89.

16. Сандлер, А. К. Інформаційно-вимірювальні пристрої на основі волоконно-оптичних технологій. – Одеса: Видатінформ НУ"ОМА", 2018. – 165 с.

17. Веретенник, О. М., Сандлер, А. К. Технічне діагностування об'єктів суднових енергетичних установок: довідник. – Одеса: Фенікс, 2019. – 167 с.

18. 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.

19. Сандлер, А. К., Опришко, М. О. Волоконно-оптичний засіб захисту суднових електромереж // Integration of Education, Science and Business in Modern Environment: Winter Debates: Proceedings of the 4th International Scientific and Practical Internet Conference, February 23 - 24. Dnipro, 2023. – P. 251 - 255.

**Abstract.** *Among the components of marine internal combustion engines, the reliability of which causes the greatest concern, the leading place belongs to the parts of the cylinder-piston group. Analysis of statistical data on the reliability of modern marine engines shows that the resource of the cylinder liner is approximately  $3 \dots 4 \cdot 10^3$ , piston heads -  $2 \dots 3 \cdot 10^3$ , covers -  $3.5 \dots 4.5 \cdot 10^3$  hours. At the same time, there is a number of sudden failures that are rapidly developing, and the determination of which is impossible without the latest means and methods of technical diagnosis. Modern means of technical diagnostics of CPG parts function under the conditions of concentrated influence of powerful electromagnetic and thermal fields, under the influence of external vibrations created by the ship's power equipment. It is these perturbations that do not allow to provide effective diagnosis and forecasting of the technical condition of the parts of the CPG according to modern operational requirements based on the main diagnostic feature - vibrations in the most informative high-frequency range. The analysis of known solutions proves that modern technical operation and repair of gas turbines requires the latest means of diagnosing and forecasting the technical condition, which are invariant to most operational destabilizing factors. It is proposed to solve the given problem through the introduction of a new fiber-optic device for monitoring the lubrication of the cylinder sleeve. The main difference from the existing analogues is that the sensor includes a bi-glass light guide, which forms a light guide coil with a reflective layer and an inertial mass at one end. In addition to the coil, the device includes a two-way optical splitter with optical filters in each branch, as well as a signal amplifier and a high-pass filter. The creation of a fiber-optic lubrication control device will allow obtaining a measuring tool that is invariant to the uncontrolled effects of destabilizing factors and has sufficient sensitivity to the controlled parameters. The use of such a tool will contribute to the organization of constant and long-term control of the lubrication process of the tribological contacts of the parts of the cylinder-piston group.*