

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 судового 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

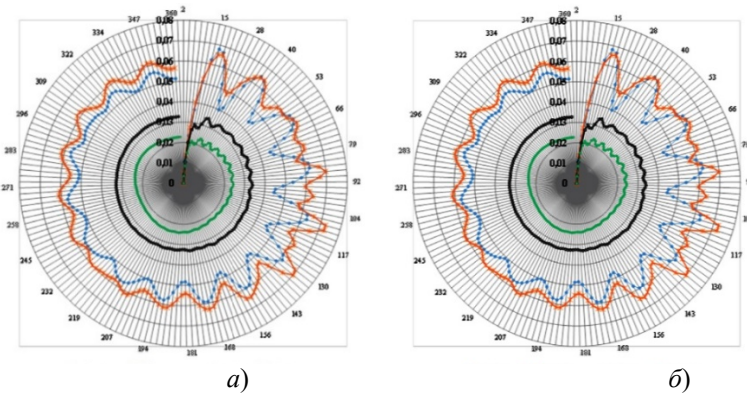


Рис. 2. Кругові діаграми віброзсувів осей за траєкторіях рухливої рівноваги в опорах лінії валопроводу за умови обертання на номінальній частоті, мм: *a)* – специфікаційні умови роботи валопроводу; *б)* – дисбаланс гребного валу

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.

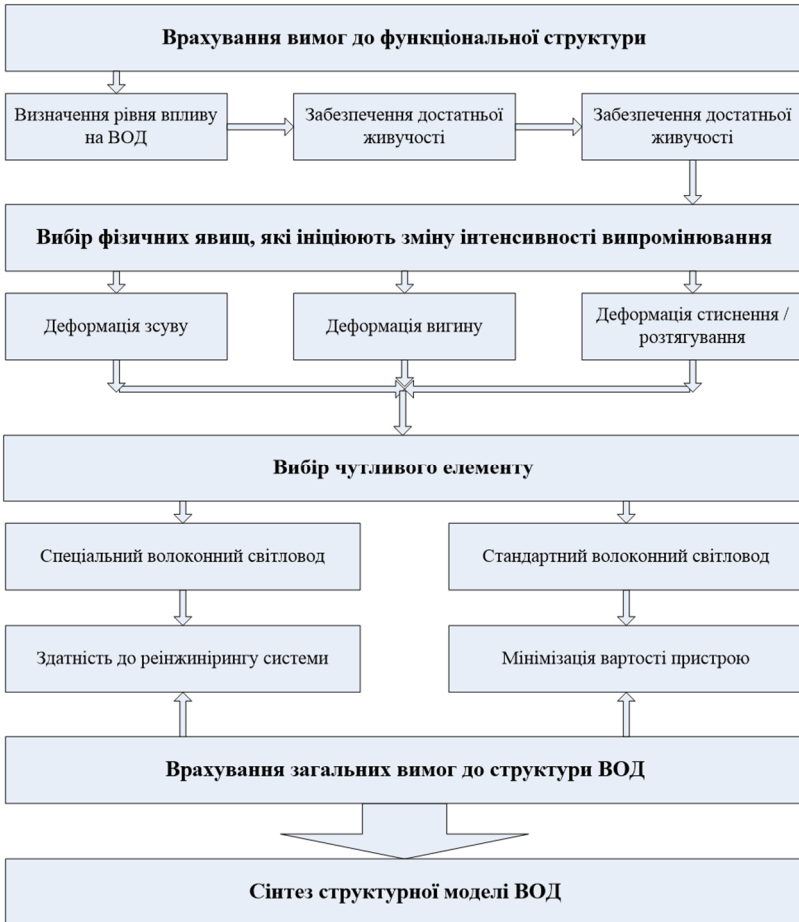


Рис. 3. Алгоритм синтезу ВОД вібрації та деформації

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.

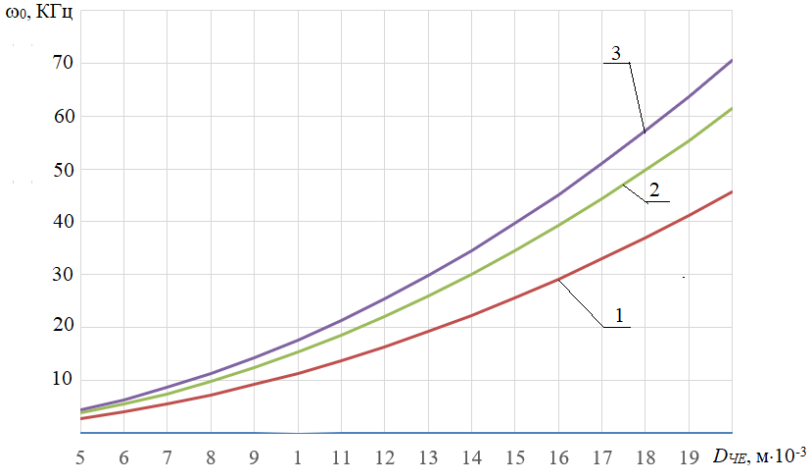


Рис. 3. Залежність власної частоти механічної системи ВОД від типу матеріалу чутливого пружного елемента при різних діаметрах чутливого елемента: 1 – штучний сапфір; 2 – фуллерен; 3 – штучний діамант

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 заводостійкості 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 C₆₀ и C20 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.