

СУЧАСНІ МЕТОДИ ТА НАПРЯМКИ ДОСЛІДЖЕНЬ ПО ЗНИЖЕННЮ РІВНЯ ГІДРОАКУСТИЧНИХ ШУМІВ СУДНА

В.Ю. Кучеренко¹, М.П. Булгаков²

¹аспірант кафедри «Судноводіння та безпеки на морі»,
старший викладач кафедри «Судноводіння та безпеки на морі»,
Одеський Національний Морський Університет,
Одеса, Україна,

ORCID ID: 0009-0008-4906-9726

²к.т.н, доцент кафедри «Судноводіння та безпеки на морі»,
Одеський Національний Морський Університет,
Одеса, Україна,

ORCID ID: 0000-0002-7172-8678

Анотація

Вступ. Морське судноплавство є одним із ключових джерел акустичного забруднення в морському середовищі. Генерація шуму, викликана механічними, гідродинамічними та аеродинамічними процесами, впливає як на роботу суден, так і на морську екосистему. Шум, що випромінюється суднами, створює значні перешкоди для морських ссавців, порушуючи їхні поведінкові і міграційні патерни. Основними джерелами шуму є кавітація гребних гвинтів, механічні вібрації двигунів та допоміжних систем, а також гідродинамічна турбулентність. Розробка методів та моделей по зменшенню акустичного забруднення регламентована стандартами та рекомендаціями ІМО MSC.337(91) та комітету із захисту морського середовища (MEPC 80).

Мета. Метою дослідження є аналіз існуючих підходів та методів що до мінімізації акустичного шуму, який генерують морські судна. Завдання включають вивчення технічних аспектів виникнення гідроакустичного шуму, пропозиції нових напрямків досліджень по створенню сучасних систем контролю та управління механічними процесами, які є джерелом акустичного забруднення.

Результати. У статті проведено аналіз та огляд існуючих підходів до зменшення рівня гідроакустичного шуму, розглянуто основні джерела шумового забруднення, їх вплив на судові конструкції та навколишнє середовище. Автор вважає доцільним проведення наукових досліджень з метою розробки інтелектуальної системи моніторингу, яка забезпечить аналіз параметрів вібрацій судових двигунів, акустичного шуму та рівня підвищення нерівномірності обертання колінчастого валу головного двигуна (ГД) в реальному часі. Це дозволить оптимізувати режими роботи двигунів, зменшити нерівномірність обертання колінчастого валу ГД за рахунок корекції одного або декількох параметрів, таких як швидкість, курс, крен та диферент судна. Як наслідок, очікується зменшення рівня структурного та підводного шуму судна, а також система дозволить своєчасно виявляти критичні відхилення в роботі судових механізмів. Крім того перспективними є розробки балансувальних пристроїв, з урахуванням новітніх

матеріалів, які зменшують торсійні коливання і структурний шум. Оптимізація профілів гребних гвинтів і використання шумоізоляційних матеріалів сприяє зниженню гідроакустичного впливу.

Висновок. Зростання акустичного забруднення в умовах інтенсивного розвитку морського транспорту вимагає інтегрованих технічних та екологічних підходів. Запропоновані рішення, спрямовані на зниження шуму та вібрацій, є перспективними для застосування у сучасному суднобудуванні та судноплавстві. Інноваційні методи зменшення шумового впливу дозволяють підвищити ефективність роботи суден і одночасно мінімізувати негативний вплив на морське середовище.

Ключові слова: акустичний шум, морське середовище, структурний шум, колінчастий вал, демпфери, гідрофони, головний двигун, шумоізоляція.

INNOVATIVE METHODS AND RESEARCH DIRECTIONS FOR REDUCING SHIP HYDROACOUSTIC NOISE

V.Y. Kucherenko¹, M.P. Bulgakov²

¹PhD student of the Department of «Navigation and Safety at Sea»,
Senior Lecturer of the Department of «Navigation and Safety at Sea»,
Odessa National Maritime University,
Odesa, Ukraine,

ORCID ID: 0009-0008-4906-9726

²PhD, Associate Professor of the Department of «Navigation and Safety at Sea»,
Odessa National Maritime University,
Odesa, Ukraine,
ORCID ID: 0000-0002-7172-8678

Summary

Introduction. Maritime shipping is one of the primary sources of acoustic pollution in the marine environment. Noise generation, caused by mechanical, hydrodynamic, and aerodynamic processes, affects both ship operations and marine ecosystems. Noise emitted by ships creates significant disruptions for marine mammals, interfering with their behavioral and migratory patterns. The primary sources of noise include cavitation of propellers, mechanical vibrations of engines and auxiliary systems, and hydrodynamic turbulence. The development of methods and models for reducing acoustic pollution is regulated by the standards and recommendations of IMO MSC.337(91) and the Marine Environment Protection Committee (MEPC 80).

Objective. The aim of this study is to analyze existing approaches and methods for minimizing acoustic noise generated by maritime vessels. The research tasks include studying the technical aspects of hydroacoustic noise generation, proposing new research directions for the development of modern control and management systems for mechanical processes that contribute to acoustic pollution.

Results. The article provides an analysis and review of existing approaches to reducing hydroacoustic noise levels, examines the main sources of noise pollution, and assesses their impact on ship structures and the surrounding environment. The author highlights the necessity of conducting scientific research to develop an intelligent monitoring system that enables real-time analysis of ship engine vibrations, acoustic

noise levels, and the degree of increased uneven rotation of the main engine crankshaft. This system would optimize engine operation modes and reduce crankshaft unevenness by adjusting one or more parameters, such as speed, course, roll, and trim of the vessel. Consequently, a reduction in both structural and underwater noise levels is expected. Additionally, the system will allow for timely detection of critical deviations in the operation of ship mechanisms. Further research in the development of balancing devices incorporating advanced materials to reduce torsional vibrations and structural noise is also considered promising. Optimization of propeller blade profiles and the use of soundproofing materials contribute to reducing hydroacoustic impact.

Conclusion. The increase in acoustic pollution amid the rapid development of maritime transport necessitates integrated technical and environmental approaches. The proposed solutions, aimed at reducing noise and vibration, are promising for modern shipbuilding and navigation. Innovative methods for noise impact reduction improve ship operational efficiency while simultaneously minimizing negative effects on the marine environment.

Key words: acoustic noise, marine environment, structural noise, crankshaft, dampers, hydrophones, main engine, soundproofing.

Постановка проблеми. Зростання обсягу морського судноплавства, хоча й важливо для світової торгівлі та економіки, породжує серйозні проблеми в сфері збереження морського середовища. Однією з таких проблем є акустичне забруднення від морських суден, яке може суттєво впливати на морську біорізноманітність екосистеми. Це викликає необхідність удосконалення методів контролю та розробку заходів по зменшенню акустичних викидів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Акустичні шуми в морському середовищі є важливим об'єктом дослідження, оскільки вони впливають на навколишнє середовище.

Регламентовані методи та принципи заміру грають ключову роль у контролі та зменшенні впливу підводних акустичних шумів [1, с. 3–5].

Гідрофони є основними інструментами для заміру акустичних шумів у воді. Вони перетворюють звукові хвилі в електричні сигнали. Використовуються різні типи гідрофонів, такі як п'єзоелектричні та векторні гідрофони. Їх використовують у гідроакустичних мережах для оцінки напрямків та інтенсивності звукових джерел [1, с. 8].

Bureau Veritas, як провідна міжнародна організація з класифікації та сертифікації морських об'єктів, регулює методи заміру підводних акустичних шумів. Вони використовуються для оцінки впливу суден та інших підводних конструкцій на морське середовище. Методи включають гідрофонні заміри, використання акустичних маяків та технічні рішення для зниження шумового викиду.

DNV (Det Norske Veritas): DNV визначає стандарти для оцінки та контролю акустичних характеристик суден та морських конструкцій. Гідрофонні мережі використовуються для замірів, але DNV також регулює використання біометричних методів для оцінки впливу на морську біорізноманітність.

IMO MSC.337(91): IMO визначає стандарти для обмеження акустичного випромінювання від суден. Стандарт MSC.337(91) визначає обов'язкові вимоги щодо обмеження шумового впливу від суден.

ABS Guide for Underwater Inspection: ABS надає керівництво щодо методів та стандартів для підводного огляду. Включає вимоги до методів заміру підводних акустичних шумів.

Експериментальні результати свідчать про можливість ідентифікації основних джерел шуму на судні, коли відомі частоти обертання головного двигуна, дизель-генераторів та інших механізмів судна. Спектральний розподіл рівня звукового тиску (SPL), отриманий за допомогою сигналів з гідрофону в діапазоні від 5 Гц до 120 кГц, та характерні частоти, пов'язані з рухом судна, ілюструються на Рис. 1, [2].

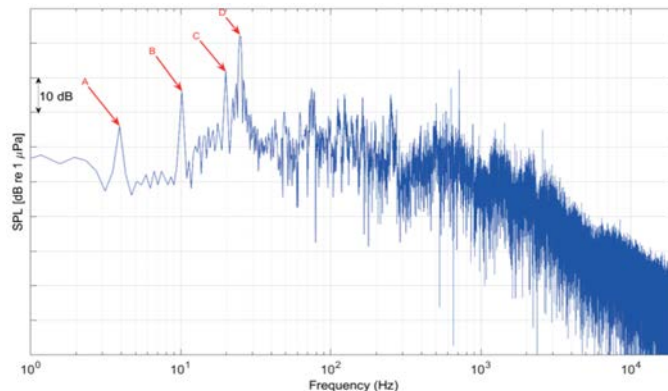


Рис. 1. А – 2 гребні вали, швидкість обертання 234 об/хв, В – 2 головні двигуни, швидкість обертання 600 об/хв, С – 2 гвинта з п'ятьма лопатками, швидкість обертання 234 об/хв, D – генератори, швидкість обертання 1500 об/хв. Спектр сигналу отриманого за проміжок часу 2 с, коли судно перебувало на мілководді [2]

Наприклад, максимальне гідроакустичне випромінювання суднового гвинта (пік С) відбувається на частоті

$$f = f_{rot} \cdot z, \quad (1)$$

де z – кількість лопаток, f_{rot} – частота обертанням суднового гвинта (Гц).

Для порівняння рівень звукового тиску (акустичного шуму), створюваного морськими організмами, значно нижчий, ніж у суден, і знаходиться в діапазоні частот від 20 Гц до 2 кГц за різними даними.

Треба зазначити що у спектрі сигналу на Рис.1 присутні динамічні шуми океану, які утворюються хвилюванням, прибоєм на березі чи рифах, течією, дощем. Також вітрове хвилювання є джерелом шуму у глибокому океані на частотах 100 Гц – 50 кГц [2, с. 176-181].

Перспективні напрямки досліджень включають розробку математичних моделей, що враховують експериментальні данні і розкривають залежності між швидкістю судна, зміною курсу, частотою обертання головного двигуна та параметрами поширення підводних акустичних хвиль:

$$f = k \cdot V + m \cdot \theta + n \cdot S, I = a \cdot V + b \cdot \theta + c \cdot S, \quad (2)$$

де f – частота звуку, V – швидкість судна, θ – зміна курсу, S – частота обертання головного двигуна, k, m, n та a, b, c – коефіцієнти, що представляють залежність

зміни частоти та інтенсивності підводного звуку (I), від зміни швидкості судна, курсу та швидкістю обертання головного двигуна.

Формулювання цілей статті. Основною метою даної статті є комплексний аналіз та огляд існуючих методів зниження структурного та підводного шуму, що утворюється під час експлуатації суден, та обґрунтування перспективних підходів для його мінімізації. Дослідження зосереджене на виявленні основних джерел шумового впливу, серед яких механічні коливання, гідродинамічні процеси та підвищення рівня нерівномірності обертання колінчастого валу ГД, з метою визначення їхнього впливу у загальний рівень акустичного шуму. Особливу увагу приділено застосуванню методів вібродіагностики та спектрального аналізу акустичних сигналів для ідентифікації зон підвищеної вібрації та можливих резонансних явищ. Важливим аспектом є дослідження можливостей математичного моделювання, зокрема розрахунку рівня звукового тиску (SPL), а також впливу динамічних характеристик суднових механізмів на поширення шуму у навколишньому середовищі.

Виклад основного матеріалу дослідження. Найбільший вплив на біологічні об'єкти справляє низькочастотний акустичний шум, який може поширюватися на великі відстані.

Комітет із захисту морського середовища (МЕРС 80) у 2023 році затвердив переглянуті Рекомендації щодо зменшення підводного шуму від комерційного судноплавства для усунення негативного впливу на морське життя. Рекомендації МЕРС фокусуються на технічні та технологічні аспекти для зниження підводного шуму від суден. Вони визначають стандарти та норми, які мають дотримуватися судновласники та суднобудівники для мінімізації негативного впливу на морське середовище. Рекомендації включають в себе використання методів та технологій, таких як використання систем активного шумозаглушення, модифікація гідродинаміки судна та впровадження новітніх матеріалів для зменшення підводного акустичного шуму. МЕРС 80 встановлює технічні стандарти та вимоги, які повинні виконувати судновласники та оператори для дотримання норм щодо підводного акустичного шуму [3, с. 3–6].

Судновласники можуть використовувати активні системи шумозаглушення для компенсації та зниження акустичного впливу суден. Для цього може використовуватися математична модель активної компенсації шуму. Активна компенсація шуму є ефективним підходом для зменшення акустичного впливу в різних середовищах, включаючи морське. Математичні моделі для активної компенсації шуму дозволяють передбачати та компенсувати акустичні хвилі, щоб забезпечити зменшення загального рівня шуму.

Математична модель починається з розгляду акустичних хвиль, які вимірюються сенсорами. Пристрій генерує власні звуки, протилежні за фазою та амплітудою до оригінального шуму (*antison*).

$$X_{total} = X_{original} + X_{antison} \quad (3)$$

де, X_{total} – загальний акустичний сигнал, що формується в середовищі.

$X_{original}$ – вихідний (початковий) шум, що випромінюється судновими механізмами (головним двигуном, гребним гвинтом, дизель-генераторами).

$X_{antison}$ – створений компенсаційний шум, що має таку саму амплітуду, але протилежну фазу відносно $X_{original}$.

Математична формула для активної компенсації шуму може бути виражена як різниця оригінального сигналу $X_{original}$ та $X_{antison}$, що призводить до мінімізації об'єму шуму.

$$X_{compensated} = X_{original} - X_{antison} \quad (4)$$

де, $X_{compensated}$ – залишковий шум після компенсації

Також деякі зміни в конструктивних особливостях судна, зокрема в оптимізації гідродинаміки, можуть відповідати вимогам МЕРС 80 для зменшення акустичного сліду суден [3, с. 3–6]. Математичні моделі можуть враховувати вплив конкретних змін на рівень шуму. Керівні принципи, видані в циркулярній формі, визнають, що комерційне судноплавство є основним джерелом підводного випромінюваного шуму URN (Underwater Radiated Noise), який негативно впливає на критичні життєві функції широкого спектру морських мешканців. Документ містить оновлені технічні знання, включаючи посилення на міжнародні стандарти вимірювань, рекомендації та нормативні акти класифікаційного товариства. Наведено зразки шаблонів, які допомагають судновласникам розробити план управління підводним шумом [4, с. 12–16]. При проведенні вимірювань і досліджень характеристик URN, визначенні джерел випромінювання пропонується використовувати такі величини і поняття як:

– *Radiated Noise Level (RNL)*:

Рівень випромінюваного шуму (RNL) вказує на рівень акустичного шуму, який випромінюється або поширюється від джерела вздовж визначеного напрямку у відкритому просторі чи іншому середовищі.

Цей показник може бути визначений як рівень звуку у конкретний момент часу або як середній рівень протягом певного періоду.

RNL може бути виражений у децибелах (дБ) та враховувати характеристики шуму, такі як частота та інтенсивність. Математично це може бути представлено у вигляді логарифмічного виміру величини шуму в порівнянні з заданим референтним рівнем.

– *Underwater Radiated Noise (URN)*:

Підводний випромінюваний шум (URN) описує акустичний шум, який генерується та випромінюється водними об'єктами чи процесами, такими як судна, морські тварини або геологічні явища, і поширюється у воді.

Математично URN визначається шляхом вимірювання акустичного тиску та інтенсивності звуку у водному середовищі. Враховуючи властивості води, можна математично моделювати поширення звуку та його вплив на довкілля.

Документ (МЕРС 80) визначає, що основні джерела URN пов'язані з гребними гвинтами, формою та геометрією корпусу, бортовим обладнанням, кільватерним потоком, а також аспектами експлуатації та обслуговування. При типових робочих швидкостях, близьких до проектної швидкості судна, більша частина підводного шуму пов'язана з кавітацією гвинта. Шум пропелера сам по собі може бути домінуючим фактором, що впливає на загальний рівень URN [3, с. 2–6].

Конструктивно-технічні підходи до зниження шуму можливі на початковому етапі проектування і складання судна. Серед підходів та рекомендацій, представлених у Керівництві щодо зниження рівня RNL, можна виділити наступні :

– Конструкція та модифікація корпусу. Потік навколо корпусу може впливати на URN, оскільки форма корпусу впливає на потік води до гвинта. Відомо, що нерівномірний або неоднорідний кільватерний слід збільшує кавітацію гвинта. Тому форма корпусу судна повинна бути спроектована таким чином, щоб кільватерний слід був максимально однорідним.

– Конструкція і модифікація гребного гвинта. Гребні гвинти повинні бути зроблені та підібрані таким чином, щоб мінімізувати кавітацію при збереженні енергоефективності. При типових робочих швидкостях кавітація може бути зменшена за нормальних умов експлуатації завдяки хорошему дизайну гвинта, оптимізації навантаження, що забезпечує рівномірний потік води через гребні гвинти (в залежності від конструкції корпусу) і ретельний підбір таких характеристик гребного гвинта, як діаметр, кількість лопатей, площа лопатей, крок, нахил і поперечний переріз.

– Поліпшення потоку кільватерного сліду. Застосування пристроїв попередньої закрутки потоку перед гвинтом (PSS), які можуть зменшити шум частоти лопатей (BPF) і підвищити ефективність гвинта.

– Монтаж і кріплення суднових механізмів. Слід приділити увагу правильному використанню віброізоляційних кріплень, а також поліпшенню динамічного балансування поршневих і обертових механізмів. Віброізолювальні опори можуть знизити вібрацію від обладнання до опори та зменшити корпусний шум. У зв'язку з рухом і передачею тяги розташування пружних опор двигуна можна розглядати в основному для чотиритактних двигунів. У двотактних двигунах не можна використовувати пружні опори, тому що тяга гребного гвинта передається двигуном безпосередньо на судно.

Особливий інтерес представляє вивчення впливу крену та диференту судна на розповсюдження акустичних шумів.

Математичні залежності, які оглядаються у даній роботі, враховують фізичні властивості судна, його рух та характеристики водного середовища. При побудові моделі враховуються кут крену та кут диференту як ключові параметри, які можуть впливати на процеси генерації та поширення акустичних хвиль в морі.

Введемо деякі ключові параметри та позначення:

- Кут крену (ϕ): Кут нахилу судна відносно горизонталі.
- Кут диференту (δ): Кут відхилення диференту судна відносно лінії його довготи.
- Акустичний імпеданс води (Z): Характеризує відгук води на рух судна та генерацію акустичних хвиль, це фізична характеристика, яка визначає реакцію водного середовища на проходження акустичних хвиль. Визначається за формулою:

$$Z = p \cdot c \quad (5)$$

де, p – густина води (кг/м^3), c – швидкість поширення звуку у воді (м/с). Розмірність акустичного імпедансу: $Z = p \cdot c = \text{кг/м}^3 \cdot \text{м/с} = \text{кг/(м}^2\text{с)}$.

- Швидкість судна (V): Швидкість руху судна відносно води.
- Амплітуда акустичних акустичного тиску (A): Міра змін тиску, пов'язана із створенням акустичного сигналу.

Математична модель може бути розроблена на базі наступних математичних та фізичних залежностей:

Генерація акустичного сигналу:

Акустичний тиск (P), пов'язаний з генерацією акустичних хвиль, може бути описаний наступною формулою:

$$P(t) = A \sin(2\pi ft) \quad (6)$$

де, $P(t)$ – тиск від акустичних хвиль від часу t , A – амплітуда тиску,

f – частота акустичних хвиль.

Вплив крену та диференту на акустичний імпеданс [11, с. 15–23].

Акустичний імпеданс Z може бути змінений відповідно до кутів крену та диференту:

$$Z(\phi, \delta) = Z_0 + \frac{1}{2} \rho V^2 S \left(\frac{\cos^2(\phi)}{C_0^2} + \frac{\sin^2(\delta)}{C_0^2} \right) \quad (7)$$

де, Z_0 – акустичний імпеданс води без врахування судна, ρ – густина води, S – площа перерізу судна, C_0 – швидкість звуку в воді [11, с.15-23].

Розповсюдження акустичних хвиль в морі може бути визначено рівнянням:

$$C(\phi, \delta) = C_0 + \Delta C \cdot \cos^2(\phi) \cdot \sin(\delta) \quad (8)$$

де, $C(\phi, \delta)$ – швидкість поширення акустичних хвиль, що залежить від кутів крену та диференту,

C_0 – швидкість поширення акустичних хвиль в воді без впливу кутів крену та диференту,

ΔC – зміна швидкості поширення акустичних хвиль [11, с. 15–23].

Це загальні математичні та фізичні залежності, які можуть служити основою для докладного аналізу та числового моделювання впливу крену та диференту судна на розповсюдження акустичних шумів у морській транспортній системі. У конкретних випадках можуть бути введені додаткові параметри та модифікації для врахування конкретних характеристик судна та особливостей дослідження.

Підходи та методи зменшення структурного шуму.

Структурний шум на морських судах виникає внаслідок механічних коливань та взаємодії різних елементів конструкції судна з водою. Зменшення цього шуму є важливою задачею для забезпечення комфорту для екіпажу, оптимізації роботи обладнання та мінімізації впливу на морське середовище [7, с. 15–21].

Розглянемо декілька методів зниження структурного шуму на судах:

- використання ізоляційних систем для відокремлення структур судна від джерела шуму. Активні системи можуть використовувати сенсори та контрольовані сили для ефективного управління вібраціями [8, с. 112–119].

- створення спеціальних гідроакустичних оболонок для зменшення шуму, що генерується водною динамікою та взаємодією корпусу судна з водою.

- оптимізація форми корпусу та використання віброізоляційних матеріалів для зменшення вібрацій та передачі шуму від судового обладнання.

З метою зниження рівня структурного шуму на судах використовуються методи вібродіагностики та параметричної діагностики, які дозволяють виявити несправності машин і механізмів на ранній стадії.

Існує загальний підхід до оцінки технічного стану машин за результатами вібрації на частинах, що не обертаються (ISO 10816). Згідно з вимогами, діагностика

технічного стану проводиться в залежності від класу механізму за загальним рівнем вібрації. Для аналізу береться середньоквадратичне (RMS) значення віброшвидкості механізму в діапазоні частот 10 – 1000 Гц [5, с. 75–79].

Для неперервного сигналу $V(t)$ середньоквадратичне значення визначається як:

$$\tilde{v}_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T V^2(t) dt} \quad (9)$$

де T – період вибірки, який повинен бути значно більшим за період будь-якого з основних аналізованих частотних сигналів, що містяться в $V(t)$ (мінімум у 20 разів). Якщо сигнал вібрації записаний дискретно і є N значень віброшвидкості V_i , то середньоквадратичне значення визначається як :

$$V_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N V_i^2} \quad (10)$$

При обчисленні СКЗ за часовим сигналом необхідно застосувати аналогові фільтри для виділення потрібного частотного діапазону 10 – 1000 Гц. Пропонується обчислювати V_{RMS} за амплітудою спектра сигналу s_j , що базується на застосуванні теореми Парсеваля для переходу від часової області до частотної.

$$V_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{2} \sum_{j=k1}^{k2} s_j^2} \quad (11)$$

де, $k1$ і $k2$ індекси гармонік на 10 Гц і 1000 Гц відповідно. Розрахувавши V_{RMS} , можна оцінити загальний технічний стан механізму за Таблицею 1, де вказані межі віброшвидкості для нормального (А) та ненормального (В, С, D) станів механізмів різних класів [5, с. 74–79].

Таблиця 1

ISO 10816 Межі зон* RMS віброшвидкості для машин різних класів [5, с. 76]

Середньоквадратичне значення, RMS віброшвидкості, мм/с	до 15 кВт клас 1	15–75 кВт клас 2	>75 кВт (жорсткий) клас 3	>75 кВт (м'який) клас 4
0.28	A	A	A	A
0.45				
0.71				
1.12	B	B	B	B
1.8				
2.8	C	C	C	C
4.5				
7.1	D	D	D	D
11.2				
18				
28				
45				

*А – гарний стан; В – задовільний стан; С – незадовільний стан; D – аварійний стан, експлуатація небезпечна.

Однією з ключових причин структурного шуму є підвищення нерівномірності обертання колінчастого валу ГД, спричинена низкою технічних і експлуатаційних факторів.

В умовах експлуатації крутний момент на колінчастому валу змінюється в залежності від циклу роботи. Ці процеси відбуваються нерівномірно через різницю у компресії циліндрів, несвоєчасну подачу палива, змінне навантаження на двигун в умовах експлуатації. Це приводить до коливань швидкості обертання колінчастого валу. Це явище не лише впливає на механічну стійкість двигуна, а й сприяє значним втратам енергії через вібрації.

Підвищення нерівномірності обертання колінчастого валу суднових дизельних двигунів може суттєво впливати на рівень вібрацій судна. Зокрема, періодичні зміни обертального моменту протягом робочого циклу двигуна призводять до коливань кутової швидкості колінчастого валу, що спричиняє вібрації. Мінливість кутової швидкості обертання колінчастого вала двигуна і машинно-рухомого комплексу, оцінюється ступенем нерівномірності обертання δ_{rot} :

$$\delta_{rot} = \frac{\omega_{max} - \omega_{min}}{\omega_{\bar{\omega}}}, \quad (12)$$

$$\omega_{\bar{\omega}} = (\omega_{max} + \omega_{min})/2, \quad (13)$$

де ω_{max} та ω_{min} – максимальна та мінімальна кутові швидкості колінчастого валу відповідно, а $\omega_{\bar{\omega}}$ – середня кутова швидкість, [10, с. 290].

Взявши за основу експериментально-аналітичний метод проф. Фоміна Ю. Я., можливо провести розрахунок ступеня нерівномірності обертання ДГ на різних режимах. Для цього треба розрахувати значення основних параметрів робочого процесу, що відповідають даному режиму: середній ефективний тиск (P_e), потужність двигуна (N_e), коефіцієнт надлишку повітря ($\alpha \Sigma$), температуру випускних газів (t_g). Значення тиску згоряння (P_z) та тиску наддуву (P_k) визначають по результатам морських ходових випробувань. Для суднових двигунів, що працюють на гребний гвинт, орієнтовне значення ступеня нерівномірності обертання (під час роботи двигуна на режимі номінальної потужності) має бути в межах 0,02-0,05 [10, с.289-290]. Погіршення технічного стану СЕУ, а також нерівномірне навантаження на двигун суттєво збільшують значення ступеня нерівномірності обертання аж до 0,12–0,14.

Підвищення нерівномірності обертання колінчастого валу безпосередньо впливає на рівень вібрацій, які передаються через корпус судна, створюючи додатковий шумовий вплив на навколишнє середовище.

Це явище посилюється в умовах крену та диференту, які змінюють розподіл навантажень і робочі параметри механічних систем. Крен і диферент спричиняють нерівномірний розподіл мастила та палива, що викликає нерівномірне згорання у циліндрах двигуна. Зокрема, у двигунах з низькою компресією або при недостатньому мастилі знижується стабільність роботи. Крім того, збільшені навантаження на деякі циліндри створюють дисбаланс у роботі двигуна, який може супроводжуватись циклічними деформаціями корпусу. Це явище ускладняється,

коли крен збільшує торсійні коливання, які, у свою чергу, можуть співпадати з резонансними частотами корпусу, посилюючи структурний шум.

Гравітаційні ефекти також відіграють важливу роль, змінюючи потоки мастила та повітря, створюючи нерівномірності у роботі циліндрів, що веде до додаткового структурного шуму.

Торсійні коливання, які виникають через змінне навантаження, можуть збігатися з резонансними частотами механічних елементів, що посилює шум і створює додаткові технічні складнощі.

Практичні наслідки таких процесів охоплюють широкий спектр проблем. Підвищені вібрації спричиняють швидке зношення компонентів двигуна, таких як підшипники, опори вала та елементи кривошипно-шатунного механізму.

Для мінімізації цих явищ важливо застосовувати комплексний підхід, який включає технічні, експлуатаційні та управлінські рішення. Наприклад, модернізація систем подачі мастила та палива з урахуванням умов крену дозволяє забезпечити рівномірність роботи циліндрів і знизити рівень вібрацій. Вдосконалення геометрії колінчастого валу та використання демпферів вібрацій дозволяє значно зменшити торсійні коливання.

Згідно з останніми експериментальними дослідженнями спектрального розподілу рівнів звукового тиску (SPL), отриманими через гідрофони, встановлено, що найбільші рівні підводного звукового тиску поширюються в діапазоні частот від 10 Гц до 1 кГц. [9, с. 45–50] Цей діапазон в основному обумовлений вібрацією конструкцій судна, головних двигунів та дизель-генераторів, які резонують на частотах, кратних основній частоті обертання, а також гідроакустичним випромінюванням гребного гвинта. Враховуючи властивості поширення низькочастотних акустичних хвиль, можна стверджувати, що існує тісний зв'язок між параметрами структурного шуму та підводного шуму (URN).

Авторські результати дослідження. Автором пропонується проведення наукових досліджень з метою подальшої розробки інтелектуальної системи моніторингу, яка забезпечить аналіз параметрів вібрацій суднових двигунів, акустичного шуму та рівня підвищення нерівномірності обертання колінчастого валу головного двигуна (ГД) в реальному часі. Аналіз цих даних може дозволити оптимізувати режими роботи двигунів, зменшити показники нерівномірності обертання колінчастого валу ГД за рахунок корекції одного або декількох параметрів, таких як швидкість, курс, крен та диферент судна. Такі заходи дозволять понизити рівень структурного шуму і як наслідок рівня гідроакустичного шуму. Рекомендації по зміні значень цих параметрів можуть формуватися за результатами ходових випробувань окремо для кожного судна.

Також актуальними на думку автора є такі інженерні рішення, як модернізація систем змащування та подачі палива, які адаптуються до умов крену та диференту судна, забезпечуючи рівномірне постачання мастила та палива до всіх циліндрів двигуна. Це дозволяє досягти стабільності роботи циліндрів, що значно знижує коливання крутного моменту і пов'язані з цим акустичні ефекти. Така адаптація базується на використанні технологій активного контролю потоку, які регулюються автоматизованими модулями в залежності від положення судна.

Висновки. Зниження структурного шуму на судах є критичною задачею сучасної морської інженерії, що потребує комплексного підходу, який поєднує

інноваційні технології, інженерні рішення та оптимізацію експлуатаційних параметрів. Впровадження сучасних шумоізоляційних матеріалів, зокрема багатопшарових композитів з високими демпфуючими властивостями, дозволяє суттєво знизити рівень передачі шуму від механізмів судна до його корпусу. Це не лише сприяє покращенню умов роботи екіпажу, а й мінімізує акустичний вплив на морське середовище, що є важливим з огляду на глобальні екологічні вимоги.

Використання активних та пасивних демпферних систем у поєднанні з вібродіагностикою, методом визначення зміни показника нерівномірності обертання колінчастого валу ГД та ДГ у реальному часі та його зменшення дозволить не лише зменшити інтенсивність шумових коливань, а й своєчасно виявляти потенційні джерела підвищених вібрацій і акустичного шуму, які негативно впливають на довговічність конструкції судна та ефективність його експлуатації.

ЛІТЕРАТУРА

1. ISO 17208-1:2016. Underwater acoustics—Quantities and procedures for description and measurement of underwater sound from ships. 2016.
2. Buszman, K. Analysing the impact on underwater noise of changes to the parameters of a ship's. *Polish Marit. Res.*, 2020. Vol. 27, No. 3, pp. 176–181. <https://doi.org/10.2478/pomr-2020-0054>.
3. MEPC.1/Circ.833 7 April 2014 Guidelines for the reduction of underwater noise from commercial shipping to address adverse impacts on marine life.
4. International Maritime Organization [IMO]. Res. A.468(XII) code on noise levels on board ships. London (UK). 1981.
5. Варбанець, Р.А., Кучеренко, Ю.М., Кирнац, В.І. Аналіз можливості вібродіагностики технічного стану суднових дизелів. *Авіаційно-космічна техніка та технологія*. Науково-технічний журнал. Харків: Національний аерокосмічний університет ім. Н.С. Жуковського "ХАІ". 2014. №6 (113). С. 74–79.
6. NOAA Fisheries. Ocean Noise and Marine Life. [Electronic resource]. Access mode: <https://www.fisheries.noaa.gov/national/science-data/ocean-noise-and-marine-life>.
7. Попов, О.П., Васильєв, С.М. Методи зниження акустичного шуму суден. *Вісник Національного технічного університету України "КПІ". Серія: Суднобудування*. 2020. № 3. С. 15–21.
8. Коваленко, І.В., Марченко, Ю.П. Аналіз акустичного впливу морського транспорту на довкілля. *Морський екологічний журнал*. 2021. Т. 1, № 2. С. 112–119.
9. Павленко, Л.Г., Іванова, О.А. Використання гідрофонів для моніторингу акустичного шуму в морському середовищі. *Вісник Харківського національного університету. Серія: Екологія*. 2019. № 8. С. 45–50.
10. Суднові двигуни внутрішнього згоряння / Ю. Я. Фомін, А. І. Горбань та ін. – Л.: Суднобудування, 1989. – 344 с.
11. Grelowska, G., Witos-Okrasińska, D. Influence of natural conditions on the imaging of the bottom of the Gdańsk Bay by means of the side scan sonar. *Polish Maritime Research*. 2018. Vol. 25, No. 3. P. 15–23. DOI: <https://doi.org/10.2478/pomr-2018-0030>.

REFERENCES

1. ISO 17208-1:2016. (2016). *Underwater acoustics—Quantities and procedures for description and measurement of underwater sound from ships*.
2. Buszman, K. (2020). Analysing the impact on underwater noise of changes to the parameters of a ship's. *Polish Maritime Research*, 27(3), 176–181. <https://doi.org/10.2478/pomr-2020-0054>
3. MEPC.1/Circ.833 7 April 2014 Guidelines for the reduction of underwater noise from commercial shipping to address adverse impacts on marine life.
4. International Maritime Organization [IMO]. (1981). *Res. A.468(XII) code on noise levels on board ships*. London (UK).
5. Varbanets, R.A., Kucherenko, Y.M., & Kyrnats, V.I. (2014). Analysis of the possibility of vibration diagnostics of technical condition of ship diesel engines [Analiz mozhlyvosti vibrodiagnostyky tekhnichnoho stanu sudnovykh dyzeliv]. *Aviation and Space Technology*, 6(113), 74–79 [in Ukrainian].
6. NOAA Fisheries. (n.d.). *Ocean Noise and Marine Life*. Retrieved from <https://www.fisheries.noaa.gov/national/science-data/ocean-noise-and-marine-life>.
7. Popov, O.P., & Vasiliev, S.M. (2020). Methods of reducing acoustic noise of ships [Metody znyzhennia akustychnoho shumu suden]. *Bulletin of NTUU KPI. Series: Shipbuilding*, 3, 15–21 [in Ukrainian].
8. Kovalenko, I.V., & Marchenko, Y.P. (2021). Analysis of the acoustic impact of marine transport on the environment [Analiz akustychnoho vplyvu morskoho transportu na dovykillia]. *Marine Ecological Journal*, 1(2), 112–119 [in Ukrainian].
9. Pavlenko, L.G., & Ivanova, O.A. (2019). Use of hydrophones for monitoring acoustic noise in the marine environment [Vykorystannia hidrofoniv dlia monitorynhu akustychnoho shumu v morskomu seredovyshchi]. *Bulletin of Kharkiv National University. Series: Ecology*, 8, 45–50 [in Ukrainian].
10. Fomin, Y.Y., Horban, A.I., et al. (1989). *Marine Internal Combustion Engines [Sudovi dvuhuny vnutrishnoho zghorannia]*. Lviv: Sudnobuduvannia [in Ukrainian].
11. Grelowska, G., & Witos-Okrasińska, D. (2018). Influence of natural conditions on the imaging of the bottom of the Gdańsk Bay by means of the side scan sonar. *Polish Maritime Research*, 25(3), 15–23. <https://doi.org/10.2478/pomr-2018-0030>