

УДК 620.170.16

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2022.1/44>**Дакі О.А.**

Дунайський інститут водного транспорту Державного університету інфраструктури та технологій

**Штрибець В.В.**

Дунайський інститут водного транспорту Державного університету інфраструктури та технологій

**Трофименко А.О.**

Дунайський інститут водного транспорту Державного університету інфраструктури та технологій

**Ліганенко В.В.**

Дунайський інститут водного транспорту Державного університету інфраструктури та технологій

**Тришин В.В.**

Дунайський інститут водного транспорту Державного університету інфраструктури та технологій

## МЕТОДИ КОНТРОЛЮ СТАНУ ПІДШИПНИКІВ СУДНОВОГО ВАЛОПРОВОДУ

*У статті проведено аналіз причин відомих пошкоджень і відмов суднових валопроводів і підшипників кочення. На підставі комплексного аналізу навантажень на валопроводи в процесі роботи визначено їх можливі дефекти. Аналіз вітчизняних і закордонних робіт у галузі контролю технічного стану механічних систем дає змогу стверджувати про доцільність та ефективність використання методів віброакустичної діагностики. Виявлено основні фактори, які визначають умови експлуатації підшипників валопроводів. Складено схему експлуатаційних пошкоджень підшипників валопроводів. Визначено процеси, що призводять до важких задирів або катастрофічного зносу й виходу з ладу підшипників валопроводів. Розроблено схему застосування основних методів діагностики підшипників кочення та виділення віброакустичних методів.*

*У 90% випадків відмови механізмів передують підвищення рівня вібрації. При реальних умовах експлуатації машин встановлено, що «між характеристиками вібрації машини та її технічним станом існує прямий зв'язок».*

*Найбільш ефективні при оцінці й прогнозуванні технічного стану різних об'єктів є п'єзоелектричні акселерометри, завдяки ним можна вимірювати вібрацію в широкому частотному й амплітудному діапазонах. Застосування віброакустичної діагностики не тільки виявляє вже розвинену несправність, що дає змогу запобігти руйнуванню, а й дає змогу знайти дефект на дуже ранній стадії. У цьому випадку можна прогнозувати аварійну ситуацію та вчасно планувати термін та обсяг ремонтних робіт. Оскільки руйнування підшипників відбувається раптово, то головне в діагностиці їх стану – виявлення дефектів до того, як трапилася серйозна поломка.*

*Аналіз методик оцінки технічного стану підшипників ВП СЕУ за зміною динамічних характеристик підтверджує, що перспективним напрямом є безрозбірна діагностика. Використання систем технічного діагностування дає змогу виконувати оцінку технічного стану підшипників ВП СЕУ в період експлуатації. Чисельні лабораторні дослідження свідчать, що виділення з вібросигналу імпульсного складника від ушкодження ефективніше досягається при використанні вейвлет-аналізу.*

**Ключові слова:** валопровід, вібродіагностика, контроль стану, судновий двигун, підшипник.

**Постановка проблеми.** Однією з причин аварій на морському транспорті є відмова вузлів та агрегатів суднової енергетичної установки (далі – СЕУ). Ресурс СЕУ визначається технічним станом осно-

вних деталей у її складі – «двигун внутрішнього згоряння» (далі – ДВЗ) – «валопровід» (далі – ВП) – «гребний гвинт» (далі – ГГ). Слабким елементом цього ланцюга є ДВЗ, оскільки в умовах реальної

експлуатації для нього характерний широкий діапазон зміни швидкісного та навантажувального режиму, у зв'язку з цим виникають динамічні явища в системі, що негативно позначається на технічному стані всієї СЕУ. За статистичними даними, через відмови вузлів СЕУ може не працювати до 20% вантажних суден судноплавних компаній. Важливою є відсутність можливості прогнозування виходу з ладу основних деталей, що вносить значну дезорганізацію в основні процеси судноплавної компанії. Більшість дефектів приходить на деталі, механізми й обладнання, які недоступні для безпосереднього контролю. До таких деталей, наприклад, належать підшипники колінчатих валів (далі – КВ) ДВЗ, підшипники та шестірні реверс-редукторних агрегатів і підшипники гребних валів (далі – ГВ). Розбирання судових ВП з метою контролю технічного стану окремих його вузлів, як правило, сполучено зі значними труднощами, виведенням з експлуатації судна в цілому, часто буває невиправданим. Крім цього, досвід експлуатації та ремонту машин, механізмів, обладнання СЕУ свідчить, що розбирання призводить до прискорення зносу деталей, оскільки порушує приробіток сполучень.

При належному технічному стані підшипники ВП можуть експлуатуватися протягом багатьох років, але на практиці робочі умови рідко бувають ідеальними. Тому контроль та оцінювання технічного стану підшипників судових ВП для забезпечення працездатності СЕУ є актуальним науково-практичним завданням.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Аналіз вітчизняних і закордонних робіт у галузі контролю технічного стану механічних систем дає змогу стверджувати про доцільність та ефективність використання методів віброакустичної діагностики. Дослідження й розробки в галузі виміру динамічних характеристик представлені в роботах С.П. Глушкова, Б.О. Лебедева, О.М. Барановського, В.С. Поповича, Л.В. Єфремова, R.B. Randall, M.G. Srinivasan, W.J. Wang, Deng Xiaomin, Quail Wang та ін. Дослідження в галузі віброакустичної діагностики безпосередньо підшипників наведено в роботах Р.Я. Коллакота, А.В. Баркова, Н.А. Баркової, В.А. Руссова, М.Д. Генкіна, А.Г. Соколової, А.А. Мінцова.

**Постановка завдання.** Метою роботи є розробка методів контролю й оцінювання технічного стану та ідентифікації пошкоджень підшипників ВП СЕУ.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Судновий ВП при-

значений для передачі обертового моменту (далі – ОМ) від ДВЗ до ГГ, сприйняття осьових зусиль упора, створюваних гвинтом при його обертанні, з подальшою передачею зусиль через упорний підшипник корпусу судна. Судновий ВП належить до тих елементів СЕУ, відмова яких для всіх одногвинтових суден призводить до повної втрати керованості судна, як наслідок, катастрофи. На рис. 1 наведений ВП СЕУ, що являє собою вал, що несе на консолях масу – ГГ.

На рис. 1 позначено таке: 1 – гвинт; 2 – дейдвудні підшипники; 3 – дейдвудна труба; 4 – гребний вал; 5 – ущільнюючий пристрій; 6 – сполучна напівмуфта; 7 – опорні підшипники; 9 – проміжні вали; 10 – судовий фундамент; 11 – упорний вал; 12 – упорний підшипник; 13 – упорний гребінь; 14 – вал двигуна або вал передачі від двигуна (наприклад, із редуктором).

У процесі руху судна ВП має складний напружений стан, який викликається дією ОМ силової установки, осьової сили від упора ГГ та впливом деформації корпусу судна.

Навантаження, що діють на судовий ВП, можуть бути розділені на систематичні та випадкові. До систематичних навантажень належать:

- величина ОМ ГД;
- сила ваги конструктивних елементів;
- передана від ГГ сила;
- гідродинамічний момент, який з'являється на ГГ через нерівномірності швидкостей потоку води, що набігає на нього;

– контактний тиск у місці посадки гвинта на вал;

– згинальні моменти ВП, які обумовлені пружною деформацією корпусу судна.

До випадкових навантажень належать:

- монтажні викривлення ВП, згинальні моменти та реакції на його опорах;
- згинальні моменти реакції на опорах ВП, викликані зносом третьових підшипникових пар;
- згинальні моменти й реакції на опорах ВП, викликані пружною деформацією корпусу під дією хвилювання;

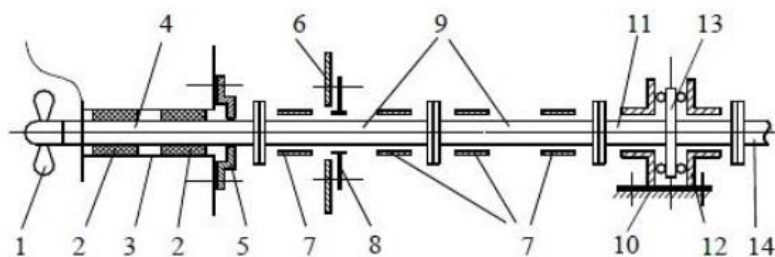


Рис. 1. Судновий валопровід

- навантаження від неврівноваженості конструктивних елементів;
- сили інерції при крені та диференті судна;
- динамічні навантаження при зіткненнях з перешкодами корпусу або ГГ.

Обертальний момент вала двигуна є величиною змінною. Його величина залежить від зміни значень суми тангенціальних зусиль по всіх циліндрах головного двигуна (далі – ГД) за один оберт, а так само від моментів інерції всіх обертових деталей двигуна. Зміни величини ОМ викликають обертальні коливання ВП, які також належать до систематичних навантажень.

Струмені потоку води, що набігають на ГГ, мають різну швидкість руху по площі його лопатей, що є причиною зміни опору його обертанню та сили упора. Різні значення сили упора зумовлюють появу поперечних і паралельних коливань гідродинамічного характеру.

Динамічний характер навантажень приводить до виникнення під час роботи ГГ складного та змінного в часі напружено-деформованого стану матеріалу валів: колінчатого, проміжного, гребного, обумовленого напружками вигину, крутіння й розтягання – стиску.

Наявні в інженерній практиці аналітичні підходи до оцінки міцності колінчатих, проміжних, гребних валів мають деяку невизначеність кінцевих результатів, оскільки не враховують комплексного впливу навантажень і не дають реальної картини напружено-деформованого стану всього вала. Крім того, через складні умови експлуата-

ції виникає низка випадкових (непрогнозованих) навантажень, які компенсуються запасами міцності [4]. Усі навантаження, що виникають у судових ВП, можна розділити за способами та видами впливу, а також упорядкувати у вигляді схеми, наведеної на рис. 2.

Особливу небезпеку для ВП містять подовжні (осьові) коливання. Подовжні коливання, впливаючи на ВП, викликають такі дефекти:

- тріщини галтелі кривошипа колінчатого вала;
- тріщини фундаменту упорного підшипника;
- тріщини лопатей ГГ;
- фретинг-корозію підшипників ВП;
- руйнування ВП.

Внаслідок впливу обертальних коливань на ВП утворюються такі дефекти:

- втомні тріщини різних ділянок ВП;
- фретинг-корозія ВП;
- втомні руйнування колінчатого вала;
- втомні руйнування ГГ;
- збільшення навантаження на опорні підшипники.

Усі обертальні коливання, які виникають у ВП, мають знакозмінний характер і зумовлені дією періодичних сил від кривошипу колінчатого вала та лопатей гвинта, що викликають закручування й розкручування окремих мас [3].

У практиці, щоб уникнути небезпечного резонансного режиму роботи судового ДВЗ, установлюють зону заборонених оборотів.

Поперечні коливання з’являються в результаті дисбалансу, зумовленого ексцентриситетом мас роторів і їх сполучних елементів при експлуатації й ремонті. Особливу небезпеку становить критична частота обертання, при якій виникає биття вала, що викликає додаткове навантаження на підшипники.

Пошкодження підшипників в експлуатаційних умовах можуть бути умовно розділені на групи (рис. 3).

Надзвичайно великі навантаження або частоти обертання, погане змащення та забруднення поверхонь є причиною втомного руйнування підшипників, що проявляється у вигляді викрашування доріжок кілець і тіл кочення.

На рис. 4 схематично виділено зовнішні ознаки, за якими можна робити висновок про вид пошкодження підшипника.



Рис. 2. Систематизація навантажень і дефектів валопроводу

У розвитку дефектів підшипника за весь термін служби можна виділити п'ять стадій (рис. 5).

На першій стадії з'являється й починає розвиватися якийсь дефект, виникають і постійно збільшуються ударні коливання. Відбувається виникнення дефекту в процесі експлуатації. Далі енергія віброімпульсів у підшипнику досягає свого максимального значення, що призводить до саморозвитку дефектів. Подальша стадія – це саморуйнування підшипника.

Автори робіт [3; 4] довели, що в 90% випадків відмові механізмів передусе підвищення рівня вібрації. При реальних умовах експлуатації машин установлено, що «між характеристиками вібрації машини та її технічним станом існує прямий зв'язок».

Застосування віброакустичної діагностики не тільки виявляє вже розвинену несправність, що дає змогу запобігти руйнуванню, а й допомагає знайти дефект на ранній стадії. У цьому

випадку можна прогнозувати аварійну ситуацію та вчасно планувати термін та обсяг ремонтних робіт. Оскільки руйнування підшипників відбувається раптово, то головне в діагностиці їх стану – виявлення дефектів до того, як трапилася серйозна поломка.

Віброакустичні методи визначення технічного стану ПК можна розділити на три групи (рис. 6).

Вимір та обробка віброакустичних процесів за допомогою обчислювально-вимірального містить послідовність дій, спрямованих на досягнення визначеної мети (рис. 7).

Збір діагностичної інформації починають із перетворення механічних величин в електричні за допомогою датчиків вимірювань коливання. При вимірі параметрів вібрації найбільше поширення отримали індукційні, індуктивні, ємнісні, тензорезистивні, п'єзоелектричні перетворювачі [2].

Тензорезистивними, індуктивними, ємнісними перетворювачами доцільно одночасно



Рис. 3. Схема експлуатаційних пошкоджень підшипників кочення



Рис. 4. Схема зовнішніх ознак пошкодження підшипника кочення



Рис. 5. Стадії розвитку дефекту підшипника в часі

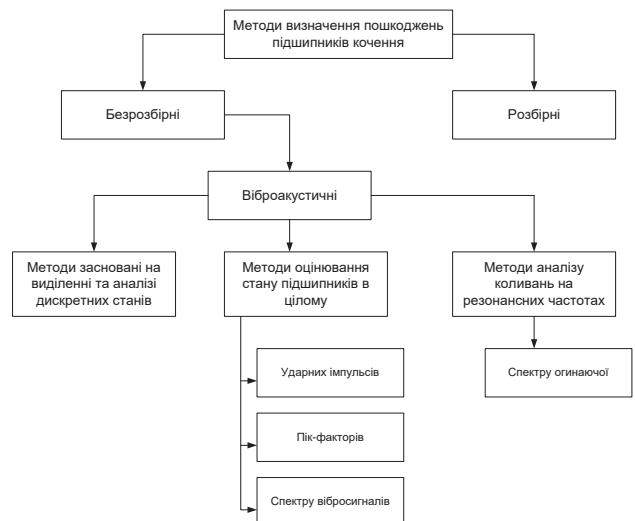
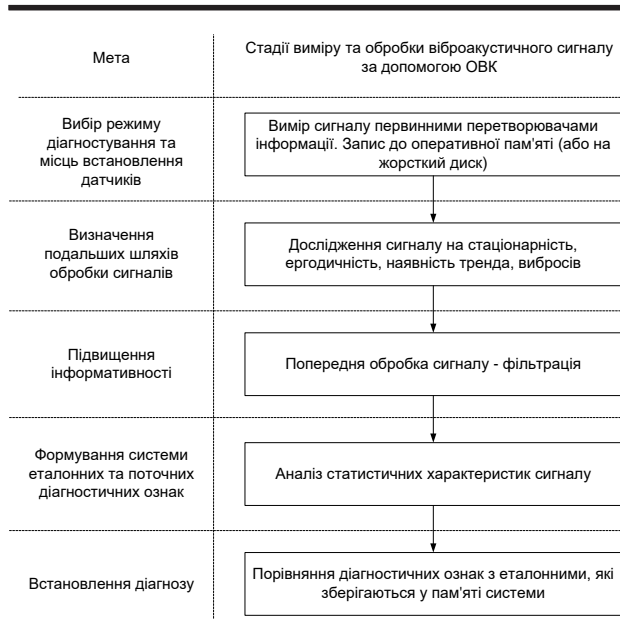


Рис. 6. Схема основних методів діагностики підшипників кочення та виділення віброакустичних методів



**Рис. 7. Схема роботи обчислювально-вимірювального комплексу**

вимірювати змінний і постійний складники динамічного процесу.

Найбільш ефективні при оцінці та прогнозуванні технічного стану різних об'єктів є п'єзоелектричні акселерометри, завдяки ним можна вимірювати вібрацію в широкому частотному й амплітудному діапазонах.

**Висновки.** Аналіз методик оцінки технічного стану підшипників ВП СЕУ за зміною динамічних характеристик підтверджує, що перспективним напрямом є безрозбірна діагностика.

Використання систем технічного діагностування дає змогу виконувати оцінку технічного стану підшипників ВП СЕУ в період експлуатації.

Чисельні дослідження свідчать, що виділення з вібросигналу імпульсного складника від ушкодження ефективніше досягається при використанні вейвлет-аналізу.

#### Список літератури:

1. Идентификация поврежденных подшипников судовых валопроводов / С.С. Глушков, Б.О. Лебедев, В.В. Коновалов, Н.С. Ткаленко. *Науч. пробл. трансп. Сиб. и Дал. Вост.* 2013. № 2. С. 200–204.
2. Генкин М.Д., Соколова А.Г. *Виброакустическая диагностика машин и механизмов.* Москва : Машиностроение, 1987. 283 с.
3. *Виброакустическая диагностика зарождающихся дефектов* / Ф.Я. Балицкий, М.А. Иванова, А.Г. Соколова, Е.И. Хомяков. Москва : Наука, 1984. 119 с.
4. Коллакот Р.А. *Диагностирование механического оборудования.* Ленинград : Судостроение, 1980. 296 с.
5. Соколова А.Г. *Методы и средства технической диагностики зарождающихся эксплуатационных дефектов механизмов. Точность и надежность механических систем* : сборник научных трудов. Рига, 1984. С. 38–48.
6. Явленский К.Н., Явленский А.К. *Вибродиагностика и прогнозирование качества механических систем.* Москва : Машиностроение, 1983. 239 с.
7. Purification and feature extraction of shaft orbits for diagnosing large rotating machinery / D.F. Shi, W.J. Wang, P.J. Unsworth, L.S. Qu. *Journal of Sound and Vibration.* 2005. P. 581–600.
8. Артоболевский П.И., Генкин М.Д., Сергеев В.И. *Задачи акустической динамики машин и конструкций. Акустическая динамика машин и конструкций* : сборник. Москва : Наука, 1973. С. 3–6.
9. Кунце Х.И. *Методы физических измерений* / пер. с нем. Москва : Мир, 1989. 216 с.
10. Shabaueh N.H., Jean Zu W. *Dynamic analysis of rotor-shaft systems with viscoelastically supported bearing.* *Mech. and Mach. Theory.* 2000. Vol. 35. № 9. P. 1313–1330.

**Daki O.A., Shtrybets V.V., Trofymenko A.O., Lihanenko V.V., Tryshyn V.V.**

#### **METHODS FOR MONITORING THE STATE OF SHAFT DRIVE BEARINGS**

*The article analyzes the causes of known damage and failures of ship shafts and rolling bearings. On the basis of the complex analysis of loadings on shaft pipelines in the course of work their possible defects are defined. The analysis of domestic and foreign works in the field of control of a technical condition of mechanical systems allows to assert about expediency and efficiency of use of methods of vibroacoustic diagnostics. The main factors that determine the operating conditions of shaft bearings are identified. The scheme of operational damages of bearings of shaft pipelines is made. Processes that lead to severe burrs or catastrophic wear and failure of shaft bearings have been identified. The scheme of application of the basic methods of diagnostics of rolling bearings and allocation of vibroacoustic methods is developed.*

*In 90% of cases, the failure of the mechanisms is preceded by an increase in vibration. Under real operating conditions of the machines, the following was established: "there is a direct connection between the vibration characteristics of the machine and its technical condition".*

*Piezoelectric accelerometers are the most effective in assessing and forecasting the technical condition of various objects, thanks to which it is possible to measure vibration in a wide frequency and amplitude range. The use of vibroacoustic diagnostics not only detects an already developed malfunction, which prevents the destruction, but also allows you to find the defect at a very early stage. In this case, it is possible to predict the emergency situation and plan in time and the amount of repair work. Since the destruction of bearings occurs suddenly, the main thing in diagnosing their condition – to identify defects before a serious breakdown.*

*The analysis of methods for assessing the technical condition of bearings SE SEU by changing the dynamic characteristics confirms that a promising area is disassembled diagnostics. The use of technical diagnostic systems allows you to assess the technical condition of the bearings of SEU during operation. Numerous laboratory studies show that the separation of the pulse component from the vibration signal from the damage is more effectively achieved using wavelet analysis.*

**Key words:** *shaft drive, vibration diagnostics, condition monitoring, marine engine, bearing.*