

**Дакі О.А.**

Дунайський інститут водного транспорту  
Державного університету інфраструктури та технологій

**Войченко Т.О.**

Дунайський інститут водного транспорту  
Державного університету інфраструктури та технологій

**Штрибець В.В.**

Дунайський інститут водного транспорту  
Державного університету інфраструктури та технологій

**Рященко О.І.**

Дунайський інститут водного транспорту  
Державного університету інфраструктури та технологій

## МЕТОД КОНТРОЛЮ ДВОХВАЛЬНОГО ПРОПУЛЬСИВНОГО КОМПЛЕКСУ ШВИДКІСНИХ СУДЕН З ЧАСТКОВО ЗАНУРЕНИМИ ГВИНТАМИ

*Метою статті є розробка методу контролю двохвального пропульсивного комплексу для підвищення ефективності експлуатації швидкісних суден з частково зануреними гвинтами на різних режимах експлуатації на основі контролю параметрів. Поставлена мета досягається шляхом розробки структури методу та відповідних процедур контролю. Метод контролю пропульсивного комплексу забезпечує контроль стану його елементів в експлуатації, дослідження теплотехнічних параметрів пропульсивного комплексу з частково зануреними гвинтами та контроль його вібраційних параметрів. Проведений аналіз підходів щодо контролю стану елементів пропульсивного комплексу в експлуатації довів, що використання вібраційних методів дозволяє оперативніше оцінити технічний стан і знайти дефекти, тому їх використання виявляється найбільш ефективним. Таким чином, врахування несправностей пропульсивного комплексу швидкісних суден з частково зануреними гвинтами, їх характер свідчать про необхідність застосування вібраційних методів контролю для такого типу суден. В основу процедури дослідження теплотехнічних параметрів пропульсивного комплексу із частково зануреними гвинтами покладено вимоги, викладені в Правилах класифікації та побудови морських суден. В основу процедури контролю за вібраційними параметрами покладено вимоги керівних документів та стандартів. При цьому, вимір значень параметрів вібрації з метою оцінки технічного стану елементів ПК швидкісних суден із частково зануреними гвинтами можуть складати частину проїмо-здавальних випробувань при введенні судна в експлуатацію і повинні проводитися під час експлуатації. Найважливішим результатом досліджень є комплексна оцінка позитивних та негативних сторін різного виду контролю технічного стану пропульсивного комплексу із частково зануреними гвинтами, а саме візуального, параметричного, трибологічного, вібраційного, яка надає перевагу вібраційним методам перед іншими видами контролю. Таким чином, врахування несправностей пропульсивного комплексу із частково зануреними гвинтами, їх характер свідчать про необхідність застосування вібраційних методів контролю для високошвидкісних суден.*

**Ключові слова:** метод, швидкісне судно, пропульсивний комплекс, частково занурені гвинти, контроль, параметри.

**Постановка проблеми.** Сьогодні в усьому світі широкого розповсюдження отримали мали судна (катери), які відносяться до класу високошвидкісних і призначені, які правило, для виконання спеціальних завдань. Високошвидкісні судна (ВШС) відрізняються швидкістю понад 50 вузлів і водотоннажністю до 60 тон.

Двохвальний пропульсивний комплекс (ПК) таких суден складається з двох високооборотних

(ВОД) головних двигунів (ГД) сумарною потужністю до 3000 кВт, реверсів-редукторів, торсіонних валів і з приводів Арнесона з частково зануреними гвинтами (ЧЗГ) фіксованого кроку. Основними режимами руху такого типу суден є водотонажний та глісируючий.

У процесі експлуатації цих швидкісних суден із ЧЗГ виникають відмови та несправності, аналіз яких показав, що вони пов'язані з констук-

тивними особливостями ПК і помилковими діями екіпажів, що призводить до підвищених навантажень ГД, високим рівням вібрації тощо.

Виникаючі відмови призводять до зниження безпеки мореплавання, простою суден, а також до значних витрат судновласників на ремонт. Проективальники та експлуатанти повинні знати причини виникнення несправностей і забезпечити комплекс технічних та організаційно-методичних заходів для їх попередження або мінімізації. Тому завдання підвищення ефективності експлуатації ПК швидкісних суден ЧЗГ на різних режимах експлуатації на основі контролю параметрів є актуальним.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Розробкою і впровадженням ефективних методів і засобів оцінки фактичного стану ЧЗГ, удосконаленням їх технічної експлуатації присвячена значна кількість досліджень.

У роботі [1] для чисельного моделювання гребних гвинтів серії Gawn використовують відкритий вихідний код OpenProp, оснований на теорії помірно навантажених підйомних ліній, та комерційний програмний пакет STAR-CCM+, оснований на теорії в'язкого потоку. Останній є більш трудомістким з точки зору часу, необхідного для підготовки моделювання, а також часу обчислень. Отримані чисельні результати порівнюються з регресійними поліномами на основі експериментальних даних. Перевірка результатів показала, що OpenProp може бути використаний як практичний та ефективний інструмент для попереднього проектування гребних гвинтів.

У роботі [2] дослідження спрямоване на вивчення впливу накипу на характеристики гребного гвинта за допомогою обчислювальної гідродинаміки (CFD). Результати представлені для гвинта, який був попередньо відсканований і оцифрований у 3D. Порівнюються результати, отримані за допомогою двох моделей турбулентності при чисельному моделюванні. Проводиться валідаційне дослідження для оцінки чисельної невизначеності. Модель переходу використовується в масштабі моделі для врахування частково ламінарного потоку. Потім гвинт масштабується і проводиться чисельне моделювання для оцінки впливу масштабу на продуктивність даного гвинта у відкритій воді.

У дослідженні [3] наведена повномасштабна модель судового руху на основі нестационарного усереднення Рейнольдса Нав'є-Стокса (URANS) для прогнозування впливу біобросання на ходові характеристики повномасштабного контейнеровоза KRISO. Модель функції

шорсткості була використана в рамках функції моделі CFD для представлення оболонки на поверхні корпусу, керма і гвинта. Побудовано імітаційну модель пропорційно-інтегрального регулятора для визначення точки самопереміщення. Моделювання проводилося з різними конфігураціями обростання корпусу та гвинта. Нарешті, досліджено вплив біологічного обростання на характеристики руху.

При проектуванні рушіїв гоночних суден використовуються різні методи розрахунку катерних ЧЗГ. У роботах [4–6] порівнюються гідродинамічні характеристики одного з ЧЗГ дослідженої серії при частковому і повному зануренні, описуються зовнішні характеристики ГД, аналізуються динамічні якості ПК для ЧЗГ, узагальнюється досвід застосування ЧЗГ на швидкісних судах, даються рекомендації з їх розрахунку.

**Мета статті** полягає у розробці методу контролю двохвального ПК для підвищення ефективності експлуатації швидкісних суден з ЧЗГ на різних режимах експлуатації на основі контролю параметрів.

**Виклад основного матеріалу.** Метод контролю ПК містить послідовне виконання трьох процедур (рис. 1):

- 1) процедуру контролю стану елементів ПК в експлуатації;
- 2) процедуру дослідження теплотехнічних параметрів ПК з частково зануреними гвинтами;
- 3) процедуру контролю вібраційних параметрів ПК з частково зануреними гвинтами.

На даний час існує декілька підходів щодо контролю стану елементів пропульсивного комплексу в експлуатації (рис. 2). З метою вибору найкращого для підходу розглянемо коротко їх зміст та недоліки.

На досліджуваних швидкісних судах візуальний контроль приводів Арнесона через особливості конструкції судна і ПК із ЧЗГ може здійснюватися тільки на стоянці. У таблиці 1 наведені робочі параметри системи гідравліки приводів Арнесона.

Недоліки візуального контролю загально відомі і майже не відрізняються для різного типу механізмів:

- не дає достатньої інформації про стан елементів приводу Арнесона у процесі експлуатації;
- необхідність у певних випадках проводити розбирання справних приводів із супутнім процесом ремонту з постановкою судна на кильблоки;
- збільшення матеріальних витрат судновласника.

Таблиця 2

Параметри на пульті оператора в ходовій рубці

№	Параметр	Позначення параметра	Одиниця виміру
1	Частота обертання колінчатого вала ГД	$n_{гд}$	хв. <sup>-1</sup>
2	Тиск мастила в ГД	$P_m$	бар
3	Температура мастила на виході з ГД	$t_m$	°С
4	Температура мастила в реверс-редукторі	$t_m$	°С
5	Температура охолоджувальної рідини на виході з ГД	$t_{ож}$	°С
6	Кути встановлення гребних валів приводів Арнесона	$\alpha$	град
7	Індикатори АПС		-

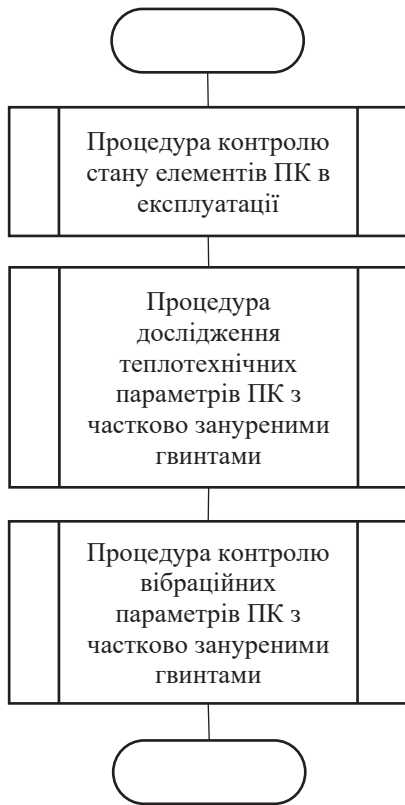


Рис. 1. Структура методу контролю ПК

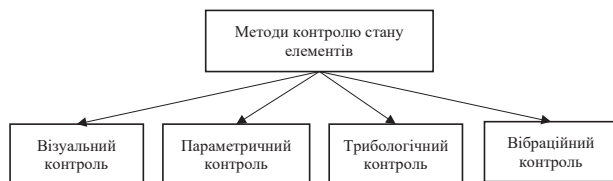


Рис. 2. Базові методи контролю стану елементів

При параметричному контролі під час роботи ПК із ЧЗГ необхідно періодично контролювати такі параметри, що виносяться на пульт оператора в ходовій рубці (табл. 2) і на пульт оператора в машинному відділенні.

Перелік контрольованих параметрів, виведених у ходову рубку, недостатній для об'єктивної оцінки стану ПК із ЧЗГ на різних експлуатаційних режимах. Оскільки перебування екіпажу в машинному відділенні під час руху судна не передбачається, то він не має постійної можливості контролювати параметри ГД. Оцінка технічного стану і пошук несправностей ПК із ЧЗГ виконується порівнянням поточних значень робочих параметрів в експлуатації з установленними нормами допустимих або базових (еталонних) значень, отриманими при ходових іспитах або першому виході (при повному завантаженні).

Недоліки параметричного контролю:  
 – кількість контрольованих параметрів у ходовій рубці є недостатньою;  
 – неможливість застосування для всіх вузлів і деталей комплексу;  
 – відсутність нормуючих показників технічного стану сучасних ПК із ЧЗГ.

Таблиця 1

Робочі параметри системи гідравліки приводів Арнесона

№ з/п	Найменування	Параметр	Значення параметра	
1	Робочий тиск у системі гідравліки рульового управління	$P_{раб.}$	8 бар	
2	Тиск настроювання протиударного клапана	Система гідравліки рульового управління	$P_{кл. РУ}$	10 бар
		Система гідравліки балансування	$P_{кл. ГБ}$	11 бар
3	Температура робочої рідини	$t_m$	не більше +70°С	
4	Робоча рідина	-	масло VG32	

При використанні методу трибологічного контролю перевірка рівня трансмісійного мастила та гідравлічного мастила здійснюється під час готування судна до виходу, кожних 30 хвилин на ходових режимах і після приходу в порт. Результати контролю записуються у вахтовий журнал, узагальнюються і щомісяця заносяться до формуляру. Витрата мастила визначалася об'ємами, що доливаються в мастильний бак. Середній об'єм мастила, що доливається, за час спостереження не перевищував 0,3 літри на місяць. При потраплянні забортної води в мастило через ущільнення хвостовика приводу виконувалася його заміна. Відповідно до контрольного переліку заходів технічної експлуатації, наведених у табл. 3, заміна мастила повинна проводитися після перших 200 годин, а далі через 500 годин роботи, або за результатами його аналізу але, не рідше 1 рази в рік.

Трибологічному контролю притаманні деякі недоліки:

- складність визначення місця дефекту;
- висока вартість існуючих засобів контролю;
- необхідність залучення висококваліфікованих фахівців;
- необхідність створення автоматизованих трибологічних комплексів на судні;
- складність у визначенні бракувальних параметрів мастил;
- недостатня кількість існуючих вітчизняних хімічних лабораторій;
- низька оперативність проведення контролю.

При вібраційному контролі оцінка технічного стану на основі контролю вібрації ПК із ЧЗГ проводиться службою сервісу тільки для ГД і реверса-редуктора. Для оцінки технічного стану приводів Арнесона, на досліджуваних судах вібраційний контроль дотепер не застосовувався. Методи і засоби вібраційного контролю не вимагають розбирання або доробки конструкції приводу Арнесона, що дуже важливо при їх експлуатації.

До переваг вібраційного контролю відносяться:

- мобільність вимірювальних приладів;
- оперативність одержання результатів вимірів;
- можливість визначення місця виникнення дефекту на етапі його виникнення;
- можливість спостереження за розвитком дефекту і недопущення досягнення ним критичних значень;
- можливість складання прогнозу щодо зміни технічного стану (ТС) об'єкта;
- можливість підбору при погіршенні технічного стану суднових технічних засобів таких режимів експлуатації, що дозволяють продовжити час експлуатації до чергового ремонту.

Використання вібраційних методів дозволяє оперативно оцінити ТС і знайти дефекти, тому їх використання є найбільш ефективним. Таким чином, врахування несправностей пропульсивного комплексу із ЧЗГ, їх характер свідчать про необхідність застосування вібраційних методів контролю для такого типу суден.

В основу процедури дослідження теплотехнічних параметрів ПК із ЧЗГ пропонується покласти вимоги, викладені у правилах класифікації та побудови суден [6]. Виміри значень теплотехнічних параметрів ПК із ЧЗГ проводяться з метою контролю та оцінки ТС під час експлуатації. В якості відповідних теплотехнічних параметрів ПК із ЧЗГ виступають:

- потужність ГД ( $N_{гд}$ );
- частота обертання ГД ( $n_{гд}$ );
- частота обертання гребного вала ( $n_{гв}$ );
- тиск наддуву ( $p_n$ );
- тиск мастила в системах ГД і реверса-редуктора ( $p_m$ );
- температура ВГ, перед та за ТК ( $t_{гг}$ );
- температура повітря на виході з ресивера ( $t_p$ );
- частота обертання ТК ( $n_{тк}$ );
- кут нахилу гребних валів приводу Арнесона ( $\alpha$ ).

Таблиця 3

**Технічне обслуговування і перевірки мастил для приводу Арнесона**

№ з/п	Найменування	Щоденно	Після перших 200 год. роботи	Через 500 год роботи, але не більш 12 мес.	Через 2000 годин роботи
Система змащення гребного валу					
1	Перевірка рівня мастила	X			
2	Перевірка якості мастила	X			
3	Заміна мастила		X	X	X
Система гідравліки					
4	Перевірка рівня мастила	X			
5	Перевірка якості мастила	X			
6	Заміна фільтра мастила			X	
7	Заміна мастила		X	X	X

Контроль теплотехнічного стану повинен виконуватися на вільній воді при хвилюванні моря не більш 1 бала і прямолінійному русі судна. Режим роботи ГД сталий. ГД та привід Арнесона повинні бути прогріті до робочої температури. Процедура контролю передбачає реєстрацію навантаження ГД, положення гребних валів у поперечній та у вертикальній площинах при зміні частоти обертання колінчатого вала ГД у діапазоні 600–2450 хв.<sup>-1</sup> через кожні 100 хв.<sup>-1</sup>.

В основу розробленої процедури контролю за вібраційними параметрами були покладені вимоги керівних документів та стандартів. Усі застосовувані засоби вимірів повинні пройти іспит або метрологічну атестацію відповідно до вимог [7, 8], та допущені до застосування і не повинні мати минулих термінів періодичної перевірки, проведеної відповідно до ДСТУ-Н РМГ 51:2006 [9].

Контроль вібраційного стану повинен здійснюватися на вільній воді при хвилюванні моря не більш 1 бала і прямолінійному русі судна. Режим роботи ГД має бути сталим. ГД та привід Арнесона повинні бути прогріті до робочої температури. Необхідно виконати не менш 3-х вимірів у кожній точці з перервою не менш 20 хв.

Проведення вібраційного контролю ґрунтується на аналізі конструктивних особливостей ПК із ЧЗГ. За результатами проведення вимірів складається протокол. Методика дозволяє:

– визначити необхідні вібраційні параметри і провести аналіз ТС його елементів;

– проводити докладний аналіз технічного стану його елементів у відповідних смугах на характерних частотах та у вузькосмугових спектрах;

– регламентувати терміни і порядок проведення вібраційних вимірів приводу Арнесона (не рідше одного разу за 200 годин роботи).

При цьому, виміри значень параметрів вібрації з метою оцінки технічного стану елементів ПК швидкісних суден із ЧЗГ можуть складати частину приймально-здавальних випробувань при введенні судна в експлуатацію і повинні проводитися під час експлуатації.

**Висновки.** Розроблений метод контролю двохвального ПК є основою підвищення ефективності експлуатації ПК швидкісних суден ЧЗГ на різних режимах експлуатації на основі контролю параметрів. Метод контролю ПК забезпечує контроль стану елементів ПК в експлуатації, дослідження теплотехнічних параметрів та контроль вібраційних параметрів ПК з ЧЗГ. Проведений аналіз підходів щодо контролю стану елементів ПК в експлуатації показав, що використання вібраційних методів дозволяє оперативно оцінити ТС і знайти дефекти, тому їх використання є найбільш ефективним. Таким чином, врахування несправностей ПК із ЧЗГ, їх характер свідчить про необхідність застосування вібраційних методів контролю для такого типу суден. В основу процедури дослідження теплотехнічних параметрів ПК із ЧЗГ покладено вимоги, викладені в правилах класифікації та побудови суден, в основу процедури контролю за вібраційними параметрами - вимоги керівних документів та стандартів [7–9].

#### Список літератури:

1. Vlašić Deni, Degiuli Nastia, Farkas Andrea, Martić Ivana. The preliminary design of a screw propeller by means of computational fluid dynamics. *Brodogradnja*. 2018. No 69. P. 129–147.
2. Grlj Carlo, Degiuli Nastia, Farkas Andrea, Martić Ivana. Numerical Study of Scale Effects on Open Water Propeller Performance. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2022. No 10(8). 17 p.
3. Song Soonseok, Demirel Yigit, Atlar Mehmet. Penalty of hull and propeller fouling on ship self-propulsion performance. *Applied Ocean Research*. 2020. No 94.
4. Taskar B., Yum K. K., Steen S., Pedersen E. The effect of waves on engine-propeller dynamics and propulsion performance of ships. *Ocean Engineering*. 2016. Vol. 122. P. 262–277.
5. Jian L., Xiwen L., Zuti Z., Xiaohui L., Yuquan Z. Numerical investigation into effects on momentum thrust by nozzle's geometric parameters in water jet propulsion system of autonomous underwater vehicles. *Ocean Engineering*. 2016. Vol. 123. P. 327–345.
6. Правила класифікації та побудови суден, 2020. URL: [http://91.203.91.178/books/Class2020\\_08.pdf](http://91.203.91.178/books/Class2020_08.pdf) (дата звернення: 29.04.2023).
7. Про метрологію та метрологічну діяльність : Закон України від 05.06.2014 р. № 1314-VII : станом на 1 січ. 2022 р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1314-18#Text> (дата звернення: 18.04.2023).
8. ДСТУ ISO 10012:2005. Системи керування вимірюванням. Вимоги до процесів вимірювання та вимірювального обладнання. Чинний від 2007-01-01. Вид. офіц. Київ : ДЕРЖСПОЖИВСТАНДАРТ УКРАЇНИ, 2007. 23 с.
9. ДСТУ-Н РМГ 51:2006. Документи до методик повірки засобів вимірювання. Основні положення (РМГ 51-2002, IDT). [Чинний від 2007-07-01]. Вид. офіц. Київ, 2007. 11 с. (Метрологія).

---

**Daki O.A., Voichenko T.O., Shtrybets V.V., Riashchenko O.I. METHOD FOR CONTROLLING THE TWIN-SHAFT PROPULSION COMPLEX OF HIGH-SPEED VESSELS WITH PARTIALLY SUBMERGED PROPELLERS**

*The aim of the work is to develop a method for controlling a twin-shaft propulsion system to improve the efficiency of high-speed vessels with partially submerged propellers in different operating modes based on parameter control. This goal is achieved by developing the structure of the method and the corresponding control procedures. The method for controlling the propulsion system provides control of the state of its elements in operation, study of the thermal parameters of the propulsion system with partially submerged propellers, and control of its vibration parameters. The analysis of approaches to controlling the state of the propulsion system elements in operation has shown that the use of vibration methods allows for a quick assessment of the technical condition and detection of defects, so their use is most effective. Thus, considering the malfunctions of the propulsion complex of high-speed vessels with partially submerged propellers, their nature indicates the need to use vibration control methods for this type of vessel. The procedure for studying the thermal engineering parameters of the propulsion system with partially submerged propellers is based on the requirements set forth in the Rules for the Classification and Construction of Ships. The procedure for monitoring vibration parameters is based on the requirements of guidelines and standards. The most important result of the research is a comprehensive assessment of the positive and negative aspects of various types of control of the technical condition of the propulsion complex with partially submerged propellers, namely visual, parametric, tribological, and vibration, which gives preference to vibration methods over other types of control. Thus, taking into account the malfunctions of the propulsion complex with partially submerged propellers and their nature indicate the need to use vibration control methods for high-speed vessels.*

**Key words:** *method, high-speed vessel, propulsion complex, partially submerged propellers, control, parameters.*