

Войченко Т.О., Бойко С.О., Штрибець В.В., Маннапова О.В.

ОСНОВНІ НАПРЯМКИ РОЗВИТКУ СУЧАСНИХ СУДНОВИХ ГВИНТО-РУЛЬОВИХ КОМПЛЕКСІВ

Метою статті є дослідження основних напрямів розвитку сучасних суднових гвинто-рульових комплексів на користь підвищення керованості судна та економії споживання палива на судні з акцентом на розвиток рулів. Поставлена мета досягається шляхом аналізу результатів досягнень у відповідній галузі сучасних компаній-розробників гвинто-рульових комплексів. В результаті дослідження основних напрямів розвитку сучасних суднових гвинто-рульових комплексів виділені такі підходи: зміна конструкції гвинто-рульового комплексу за допомогою, наприклад, добування таких елементів, як обтічник, вставка обтічника та маточина гребного гвинта (компанія Wärtsilä); використання гвинто-рульового комплексу із закрилком та в комбінації зі спеціальним підшипниковим вузлом KSR Rudder support (компанія Bekker Marine System); зміна положення гвинто-рульового комплексу з конструкцією руля зі скривленою передньою кромкою (компанія Bekker Marine System); реалізація гвинто-рульового комплексу у вигляді гвинто-рульової кутової колонки (компанія Aquamaster – Rauma Ltd); запропонована інноваційна система гвинта з активною рульовою насадкою Gate Rudder (компанія Wärtsilä, Kuribayashi Steamship Co та ін.). Результатом запропонованих інновацій є, наприклад, зниження споживання палива на 3-7% (компанія Wärtsilä), або підвищення керованості судном за рахунок того, що кут перекладки руля становить +/- 65 градусів і додатковий кут у 45 градусів повороту закрилка забезпечують високу маневреність судна та гарне утримання позиції (компанія Bekker Marine System).

Ключові слова: судно, гвинто-рульовий комплекс, руль, конструкція, керованість, маневреність, паливо.

Постановка проблеми. Керованість судна є одним з найважливіших теоретичних та практичних якостей судна – це здатність утримувати заданий напрямок або зміну напрямку при русі судна. Керованість судна забезпечується силою, що створює крутний момент навколо вертикальної осі, що проходить через центр тяжіння судна. Кожне судно повинне мати надійний пристрій, що забезпечує його поворотність та стійкість на курсі. Таку вимогу можуть задовольняти, зокрема, гвинто-рульові комплекси судна.

Складовими частинами гвинто-рульового комплексу, що становить більшість пристроїв морських суден, для керування судном є: пір'я руля, поворотні насадки, балер руля, знімний рудерпост, штирі руля та поворотні насадки, підшипники рульового пристрою і т. д. Усі вищеописані складові рульового пристрою, розташовуються в підводній частині судна. До надводних складових частин рульового пристрою відносяться румпель, сектор, рульовий привід і т. д. При цьому необхідно зазначити, що споживання палива на судні багато в чому залежить від ефективності роботи саме гвинто-рульового комплексу.

У цій статті розглядається конструкція сучасних гвинто-рульових комплексів суден та основні напрями їх розвитку з метою підвищення керованості судна та економії споживання палива на судні з основним акцентом на розвиток рулів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У галузі розвитку гвинто-рульових комплексів суден у публікаціях на даний час особливу увагу приділялося розвитку конструкцій гребних гвинтів, наприклад, [1 - 4]. Дослідження напрямів розвитку конструкції

рулів гвинто-рульових комплексів суден висвітлено в літературі менше, в основному, в рамках досліджень компаній виробників гвинто-рульових комплексів суден, наприклад, [5 - 7]. У роботі [8] показані результати досліджень, зокрема, лише компаній Wärtsilä та Bekker, без порівняння з традиційною конструкцією рулів і без розгляду подальших тенденцій розвитку у цій галузі.

Тому проведення дослідження щодо основних напрямів розвитку сучасних суднових гвинто-рульових комплексів є актуальним завданням.

Метою статті є дослідження основних напрямів розвитку сучасних суднових гвинто-рульових комплексів на користь підвищення керованості судна та економії споживання палива на судні з акцентом на розвиток рулів.

Викладення основного матеріалу дослідження. Гвинто-рульові комплекси суден класифікують за такими ознаками: розташування осі обертання руля, розміщення руля щодо елементів конструкції кормового краю і за типом кріплення руля.

Основними елементами гвинто-рульового комплексу є такі (рис. 1):

- 1) руль – плоска конструкція, поворот якої за рахунок взаємодії з водою під час руху судна призводить до утворення сили, необхідної для управління судном;
- 2) балер – вал, призначений для повороту руля;
- 3) рульовий привід – пристрій, що забезпечує передачу на балер моменту, необхідного для повороту руля;
- 4) рульова передача – силовий або керуючий сполучний елемент між рульовою машиною та рульовим приводом;
- 5) привід управління – пристрій, що забезпечує зв'язок посту управління з рульовою машиною;
- 6) рульова машина – механізм, що створює момент, необхідний для перекладки руля.

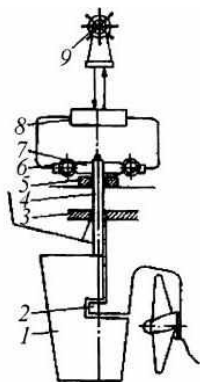


Рисунок 1 – Узагальнена схема гвинто-рульового комплексу:

- 1 – перо руля;
- 2 – опора пера руля;
- 3 – нижній підшипник балера;
- 4 – балер;
- 5 – верхній підшипник балера;
- 6 – рульова машина з рульовою передачею;
- 7 – рульовий привід;
- 8 – привід управління;
- 9 – пост управління.

Гвинто-рульовий комплекс має також запасні та аварійні рульові приводи, обмежувачі перекладки руля та багато інших елементів, що забезпечують ефективну та надійну роботу пристрою.

Надалі пропонується розглянути конструкції сучасних гвинто-рульових комплексів суден та основні напрями їх розвитку, а саме:

- гвинто-рульовий комплекс компанії Wärtsilä;
- гвинто-рульовий комплекс компанії Bekker;
- гвинто-рульовий комплекс компанії Aquamaster - Rauma Ltd.

На рис. 2 представлені для порівняння традиційна та інноваційна конструкція гвинто-рульового комплексу компанії Wärtsilä [5, 8].

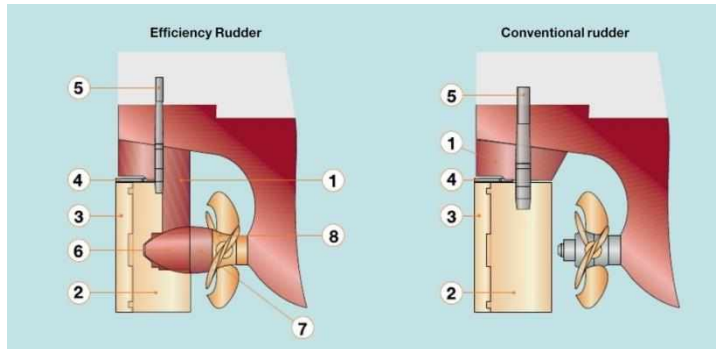


Рисунок 2 – Зіставлення конструкції традиційного (Conventional rudder) та інноваційного (Efficiency rudder) гвинто-рульового комплексу компанії Wärtsilä:

- 1 – кронштейн проміжної опори руля судна;
- 2 – перо руля;
- 3 – закрилок;
- 4 – механізм закрилка;
- 5 – балер руля;
- 6 – обтічник;
- 7 – вставка обтічника;
- 8 – маточина гребного гвинта.

Efficiency rudder компанії Wärtsilä з обтічником має такі переваги:

- при зниженій швидкості вхідного потоку особливо в районі маточини, гребний гвинт може працювати більш ефективно;
- більш однорідний та менш звужений супутній потік за гребним гвинтом знижує втрати кінетичної енергії;
- тертя на маточині гребного гвинта знижено за рахунок того, що в порівнянні з традиційним гвинто-рульовим комплексом вдається уникнути поділу потоку.

Всі перелічені фактори роблять свій внесок у зниження необхідної потужності для підтримки еквівалентного упору гребного гвинта. Результатом зниження є споживання палива на 3-7%, зниження вібрації та шуму на борту судна; підвищуючи тим самим комфортабельність для екіпажу та пасажирів. Обтічник, встановлений за гребним гвинтом, знижує флуктуації потоку, що набігає. Пульсації тиску, що виникають від роботи гребного гвинта, знижуються на 20-40%. Пульсації тиску корпус судна також знижуються на 20-40%.

Основні вузли гвинто-рульового комплексу компанії Wärtsilä представлені на рис. 3, де:

1. Rudder stock – шток руля, верхня частина якого з'єднана з рульовим механізмом, а нижня входить у стяжне кільце руля.
2. Bearings – підшипники з композитних матеріалів з водяним мастилом, що забезпечує їх мінімальний знос.
3. Flap – закрилок руля: зварна конструкція, посилена у верхній частині для забезпечення надійності його роботи, з'єднується з рулем за допомогою штока.
4. Horn pintle – рульовий штир, стрижень їхньої нержавіючої сталі, що забезпечує кріплення підвісного руля до обтічника.
5. Torpedo – обтічник: міцна, зварна конструкція, з'єднана з рудерпостом болтовим з'єднанням.

6. Fore torpedo – передня частина обтічника: зварна конструкція скріплена болтами з обтічником, що має зовнішню обшивку профілю, що обтікається.

7. Propeller blades – лопаті гребного гвинта: мають оптимізовану конструкцію, яка важлива для взаємодії між гребним гвинтом, рулем та корпусом судна.

8. Fairing – обтічник маточини гребного гвинта: виливок з нікель-алюмінієво-бронзового сплаву, форма якої забезпечує ефективну взаємодію зі маточиною та лопатями гребного гвинта. Повертається разом із гребним гвинтом.

9. Rudder horn – рудерпост, міцна, обтічна форма, лита/зварна конструкція з міцним кріпленням до корпусу судна. На вимогу замовника може з'єднуватися з палубою, де розміщена рульова машина.

10. Flap mechanism – механізм, керуючий закрилком: міцна конструкція щоб уникнути проблем у процесі роботи. Штирі з нержавіючої сталі, стійкої до зносу, з'єднання яких з рудерпостом виконується гарячою посадкою.

11. Rudder blade: rigid, slender cast/welded structure – перо руля: міцна, обтічної форми, лита/зварна конструкція. З'єднується з обтічником за допомогою рульового штиря.

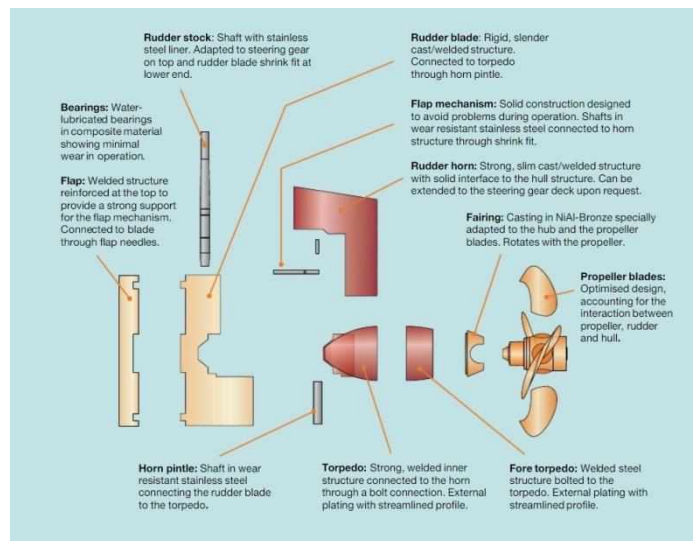


Рисунок 3 - Вузли гвинто-рульового комплексу компанії Wärtsilä

Однією з провідних компаній у галузі розробки конструкцій ефективних гвинто-рульових комплексів є компанія Bekker [6, 8].

На рис. 4 представлена схема конструкції гвинто-рульового комплексу із закрилком цієї компанії.

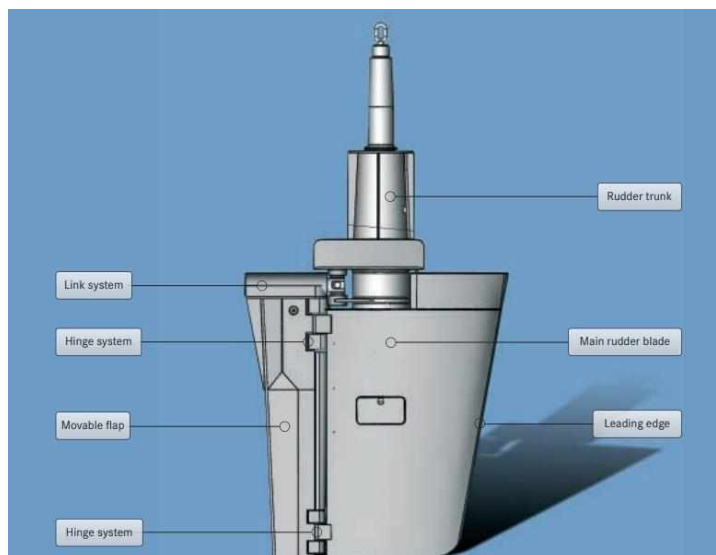


Рисунок 4 – Гвинто-рульовий комплекс із закрилком компанії Bekker Marine System:

- 1) Link system – система кріплення;
- 2) Hinge system – система шарнірів;
- 3) Movable flap – закрилок;
- 4) Rudder trunk – гелмпорт;
- 5) Main rudder blade – перо руля;
- 6) Leading edge – передня кромка руля.

Гвинто-рульовий комплекс із закрилком або руль Беккера – це ефективна система, що дозволяє підвищити маневреність судна. Оптимізований профіль пера руля, балансування руля, співвідношення між пером руля та закрилком, система петель гарантують надійну та ефективну роботу руля. Кут перекладки руля становить ± 65 градусів і додатковий кут у 45 градусів повороту закрилка забезпечують високу маневреність судна та гарне утримання позиції. У комбінації зі спеціальним підшипниковим вузлом KSR Rudder support компанії Becker, руль із закрилком може мати необмежений діапазон розмірів. З цим вузлом гелмпортובה труба (rudder trunk) продовжується в перо руля таким чином, що нижній проміжний підшипник розміщується, наскільки це можливо, ближче до центру докладання зусилля, що впливає на руль. Завдяки укороченому плечу важеля, напруги та згинальні моменти в балері руля та гелмпортбовій трубі значно знижуються. Реактивні зусилля в несучому підшипнику будуть при цьому значно менше, що робить руль менш схильним до вигину.

Наступним інноваційним підходом є зміна положення гвинто-рульового комплексу. Рулі традиційної конструкції розміщуються за гребним гвинтом, причому в поперечному перерізі руль має симетричну конфігурацію щодо його вертикальної центральної площини. Однак, така конструкція не враховує того факту, що гребний гвинт генерує завихрений потік, що впливає на перо руля. Результатом є утворення областей низького тиску на кермі, що викликає кавітацію та пов'язані з нею проблеми ерозії металу руля. Щоб уникнути кавітації та підвищити маневреність балансирующего руля, компанія Becker Marine System розробила конструкцію руля з викривленою передньою кромкою. Основними характеристиками такого гвинто-рульового комплексу є:

- більший критичний кут атаки руля;
- немає рудерпоста, немає кавітації;
- оптимізований профіль руля;
- висока пропульсивна ефективність;
- зменшена товщина профілю руля.

Наступний похід, реалізація гвинто-рульового комплексу у вигляді гвинторулевої кутової колонки, наприклад, компанії Aquamaster – Rauma Ltd., у якого момент, що крутить, від

приводного двигуна, дизеля або електродвигуна, розташованого вище ватерлінії (звичайно в кормовому краю судна), передається на гребний вал, розташований нижче за ватерлінію, за допомогою кутового редуктора (КР). КР розміщений у герметичному корпусі (гондолі), заповненому мастилом. Вихідний вал КР проходить через дейдвудний пристрій (сальник) і з'єднаний через муфту та головний упорний підшипник з гребним гвинтом. Недоліками такого пристрою є [7]:

- наявність дейдвудного пристрою, який не може повністю виключити попадання води в редуктор, що знижує надійність всього пристрою, оскільки редуктор не може працювати на обводненому маслі;

- наявність кутової редукторної передачі, що призводить до збільшення рівня шуму та вібрації (структурний та підводний компонент);

- великий діаметр гондолої, в якій розташовується нижній кутовий редуктор і головний упорний підшипник, порівняно з діаметром гребного гвинта, що знижує коефіцієнт пропульсивної корисної дії.

Останній недолік пов'язаний з тим, що висока потужність, що передається кутовою передачею на гребний гвинт, вимагає застосування шестерень великого діаметра. У той самий час пропульсивний коефіцієнт корисної дії (ККД) залежить від відношення діаметра гондолої до діаметру гребного гвинта – Кд. Що менше Кд, то вище ККД. На даний час у гвинтових комплексах з кутовими редукторами (а також у варіанті з вбудованими в гондолу гребними електродвигунами) значення Кд лежить в межах 0,5-0,6.

На закінчення відзначимо, що на цьому передові компанії не зупиняються і продовжують активні дослідження та розробки у галузі конструкцій сучасних суднових гвинто-рульових комплексів. Так, наприклад, технологічна група компанії Wartsila за згодою всіх японських патентовласників, які розробляють нову систему гвинта з активною рульовою насадкою Gate Rudder, підписала ліцензійну угоду та угоду про співпрацю з компанією Kuribayashi Steamship Co для розробки, продажу та обслуговування системи гвинт – активний руль. Крім Kuribayashi Steamship Co, іншими патентовласниками технології Gate Rudder є Kamome Propeller, Національний морський Інститут, японський розробник портових і авіаційних технологій NIMPAT, Yamanaka Shipbuilding і японський професор Норіюкі Сасаки. Комплекс гвинта з поворотними бічними рулями як невід'ємна частина ефективних рішень Wartsila для нових суден допоможе покращити індекс енергоефективності проекту судна (EEDI). Дана технологія буде доступна як для суден, що будуються, так і для модернізації діючих. Для судновласників це може вплинути на підвищення паливної ефективності, поліпшення маневреності та стійкості на курсі як при штилі, так і при хвилюванні на морі, а також на рівні шумів та вібрації. Крім того, цю конструкцію можна буде використовувати для модернізації звичайних двигунів.

Висновки. В результаті дослідження основних напрямів розвитку сучасних суднових гвинто-рульових комплексів на користь підвищення керованості судна та економії споживання палива на судні можна виділити такі підходи:

- зміна конструкції гвинто-рульового комплексу за допомогою, наприклад, добування таких елементів, як обтічник, вставка обтічника та маточина гребного гвинта (компанія Wärtsilä);

- використання гвинто-рульового комплексу із закрилком та в комбінації зі спеціальним підшипниковим вузлом KSR Rudder support (компанія Bekker Marine System);

- зміна положення гвинто-рульового комплексу з конструкцією руля зі скривленою передньою кромкою (компанія Bekker Marine System);

- реалізація гвинто-рульового комплексу у вигляді вінторульової кутової колонки (компанія Aquamaster – Rauma Ltd);

- запропонована інноваційна система гвинта з активною рульовою насадкою Gate Rudder (компанія Wärtsilä, Kuribayashi Steamship Co та ін.).

Реалізація розглянутих напрямів розвитку сучасних суднових гвинто-рульових комплексів дозволяє безпосередньо підвищити керованість судна та забезпечити економію споживання палива на судні.

ЛІТЕРАТУРА

1. Litwin, W. and Dymarski, C. (2016), "Experimental Research on Water-Lubricated Marine Stern Tube Bearings in Conditions of Improper Lubrication and Cooling Causing Rapid Bush Wear," *Tribology International*, 95, pp 449–455.
2. Коноплёв А.В., Кононова О.Н. Оценка сопротивления усталости восстановленных деталей судовых машин и механизмов // Вісник ОНМУ: Збірник наукових праць. Випуск 2 (55) [Фахове видання України]. – Одеса: ОНМУ, 2018. – С. 68-74.
3. Шумило О.М., Кононова О.М., Вітюк Л.С. Технічна експертиза зруйнування суднового гребного валу // Вісник ОНМУ: Збірник наукових праць. Випуск 4 (57) [Фахове видання України]. – Одеса: ОНМУ, 2018. – С.73-92.
4. Стальниченко О.И., Иоргачёв Д.В., Иоргачёв В.Д. Технологии восстановления и упрочнения деталей судов технического флота. – Одесса: Изд-во ОНМУ. – 2019. – 240 с.
5. Propulsors and gears [режим доступу <https://www.wartsila.com/marine/products/propulsors-and-gears>, дата звернення: 02.11.2022]
6. Becker Marine Systems [режим доступу <https://www.becker-marine-systems.com/>, дата звернення: 02.11.2022]
7. Kongsberg [режим доступу <https://www.kongsberg.com/>, дата звернення: 02.11.2022]
8. Особенности устройства новейших судовых рулей [режим доступу <https://sudostroenie.info/novosti/22517.html>, дата звернення: 02.11.2022].

REFERENCES

1. Litwin, W. and Dymarski, C. (2016), "Experimental Research on Water-Lubricated Marine Stern Tube Bearings in Conditions of Improper Lubrication and Cooling Causing Rapid Bush Wear," *Tribology International*, 95, pp 449–455.
2. Konoplyov A.V., Kononova O.N. Evaluation of fatigue resistance of restored parts of ship machines and mechanisms // Bulletin of ONMU: Collection of science practices. Issue 2 (55) [Fahov's view of Ukraine]. - Odessa: ONMU, 2018. - S. 68-74.
3. Shumilo O.M., Kononova O.M., Vityuk L.S. Technical expertise of the ship's propeller shaft bearing // Bulletin of ONMU: Collection of scientific work. Issue 4 (57) [Fahov's view of Ukraine]. - Odessa: ONMU, 2018. - P.73-92.
4. Stalnichenko O.I., Iorgachev D.V., Iorgachev V.D. Technologies for the restoration and hardening of parts of ships of the technical fleet. - Odessa: ONMU Publishing House. - 2019. - 240 p.
5. Propulsors and gears [available at <https://www.wartsila.com/marine/products/propulsors-and-gears>, date of launch: 02.11.2022]
6. Becker Marine Systems [available at <https://www.becker-marine-systems.com/>, date of entry: 02.11.2022]
7. Kongsberg [available at <https://www.kongsberg.com/>, date of entry: 02.11.2022]
8. Features of the device of the latest ship rudders [access mode <https://sudostroenie.info/novosti/22517.html>, date of completion: 02.11.2022].

Voichenko T.O., Boiko S.O., Stribets V.V., Mannapova O.V.**MAIN DIRECTIONS OF DEVELOPMENT OF MODERN SHIP PROPELLER-STEERING COMPLEXES**

The purpose of the article is to study the main directions of development of modern propeller-rudder ship complexes in favor of increasing the controllability of the ship and saving fuel consumption on the ship, with an emphasis on the development of rudders. This goal is achieved by analyzing the results of achievements in the relevant industry by modern companies developing rudder propeller systems. As a result of the study of the main directions of development of modern marine rudder propeller complexes, the following approaches were identified: changing the design of the rudder propeller complex by, for example, extracting such elements as a fairing, a fairing insert and a propeller hub (Wärtsilä company); the use of a propeller-rudder complex with a flap and in combination with a special KSR Rudder support bearing unit (Bekker Marine System); changing the position of the propeller-rudder complex with a rudder design with a curved leading edge (Bekker Marine System); implementation of a propeller-rudder complex in the form of a propeller-rudder angular column (Aquamaster - Rauma Ltd); an innovative propeller system with an active steering nozzle Gate Rudder (Wärtsilä, Kuribayashi Steamship Co, etc.) was proposed. The proposed innovations result in, for example, a 3-7% reduction in fuel consumption (Wärtsilä) or an increase in the ship's controllability due to the fact that the rudder angle of +/- 65 degrees and an additional 45 degrees of flap angle provide high maneuverability of the vessel. and good position holding (Bekker Marine System).

Keywords: ship, propeller-steering complex, rudder, structure, controllability, maneuverability, fuel.