

О. М. ЛЕБЕДЬ

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри загальнофахової підготовки та морської безпеки
Херсонська державна морська академія
ORCID: 0000-0001-5603-9244

КЕРУВАННЯ РУХОМ СУДНА ПРИ БОРТОВІЙ ХИТАВИЦІ НА БАЗІ НЕЧІТКОЇ ЛОГІКИ

Серед багатьох чинників, що впливають на експлуатаційні характеристики судна, є явище хитавиці, зумовлене впливом зовнішніх факторів, таких як морське хвилювання, вітер, течії. При цьому значною мірою збільшується опір руху судна, що приводить до збільшення витрат енергетичних ресурсів на роботу рушія пропульсивної установки. Також може спостерігатися некоректна робота самої пропульсивної установки, спостерігається негативний вплив на вестибулярний апарат людини. Використання штормових діаграм районів плавання не завжди спроможне усунути негативний вплив хитавиці на рух судна.

В рамках даної роботи проаналізовані основні засоби усунення негативного впливу хитавиці на морехідні якості судна. Акцентовано увагу на тому, що початкові способи стабілізації руху судна нормуються вже на етапі його проектування, при розробленні карго-плану, зменшення площі ватерлінії.

Розглянуто основні типи заспокійників хитавиці, що використовуються при судноплаванні. До них відносяться вилічні кілі, бортові керовані керма, гіроскопи. Особливу увагу акцентовано на використанні в якості заспокійника хитавиці активних та пасивних цистерн, переміщення водяних мас в яких здатне змінити кут крену та частоту коливань судна при хитавиці. При цьому застосування пасивних цистерн обмежено, так як вони ефективні лише при резонансній хитавиці.

Найбільш перспективними заспокоювачами хитавиці є активні цистерни, але для ефективної їхньої роботи впроваджується складна система управління, яка повинна достатньо оперативно реагувати на зовнішні збурення.

В даній роботі, створено математичну модель керування роботою активних цистерн на судні, які використовуються в якості заспокійників хитавиці. Дана модель використовує інструменти нечіткої логіки Matlab Simulink з розширенням Fuzzy Logic Toolbox. У дослідженні представлено функції належності для вхідних і вихідних лінгвістичних змінних. Вхідними лінгвістичними змінними є кут крену, напрямок вектору кута крену, кут швидкості. Вихідною лінгвістичною змінною є ступінь відкриття клапанів компресорів для перекачування води між цистернами.

Ключові слова: бортова хитавиця, заспокоювач хитавиці, нечітка логіка, система стабілізації хитавиці, Matlab Simulink, Fuzzy Logic Toolbox, лінгвістичні змінні.

O. M. LEBED

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of General Professional Training
and Maritime Safety
Kherson State Maritime Academy
ORCID: 0000-0001-5603-9244

VESSEL MOTION CONTROL DURING ROLLING BASED ON FUZZY LOGIC

Among the many factors affecting a vessel's performance is pitching, which is caused by external factors such as sea waves, wind, currents. This significantly increases resistance to the vessel's motion, leading to increased energy consumption for the propulsion system. Incorrect operation of the propulsion system itself may also occur, and a negative impact on the human vestibular system has been observed. Using storm diagrams for navigation areas is not always able to eliminate the negative impact of pitching on a vessel's motion.

This paper analyzes the primary means of mitigating the negative impact of pitching on a vessel's seaworthiness. It emphasizes that initial methods of stabilizing a vessel's motion are standardized at the design stage, when developing a cargo plan and reducing the waterline area.

The main types of stabilizers used in shipping are discussed. These include bilge keels, rudders, and gyroscopes. Particular attention is paid to the use of active and passive stabilizers, as the movement of water masses in these tanks



can alter the vessel's heel angle and oscillation frequency during rolling. However, the use of passive tanks is limited, as they are effective only during resonant roll.

Active tanks are the most promising stabilizers, but their effective operation requires the implementation of a complex control system that must quickly respond to external disturbances.

In this paper, a mathematical model for controlling the operation of active tanks on a ship, which are used as stabilizers, is developed. This model utilizes fuzzy logic tools in Matlab Simulink with the Fuzzy Logic Toolbox extension. The study presents membership functions for input and output linguistic variables. The input linguistic variables are the bank angle, the direction of the bank angle vector, and the angular velocity. The initial linguistic variable is the opening degree of the compressor valves used to pump water between the tanks.

Key words: roll, roll stabilizer, fuzzy logic, roll stabilization system, Matlab Simulink, Fuzzy Logic Toolbox, linguistic variables.

Постановка проблеми

Серед багатьох чинників, що впливають на експлуатаційні характеристики судна, є явище хитавиці, зумовлене впливом зовнішніх факторів, таких як морське хвилювання, вітер, течії та інші. Під хитавицею, перш за все, розуміють відхилення положення судна від рівноважного і періодичне проходження такого стану. При чому негативний вплив хитавиці спостерігається не лише при відхиленні судна від рівноважного стану, а й при наближенні до нього. Крім небезпеки великих кутів відхилення положення судна від рівноважного стану, небезпечними є також прискорення при хитавиці, результат дії яких може призвести до руйнувань елементів корпусу судна. При цьому найбільших механічних напружень зазнають верхні елементи конструкції судна, де прискорення значно вищі. Виникаючі, при цьому інерційні та гіроскопічні сили додатково зменшують стабільність руху судна.

Хитавиця має беззаперечний негативний фізіологічний вплив на людину, на її вестибулярний апарат. При цьому використання фармакологічних засобів для полегшення стану людини не завжди приведе до позитивних результатів.

Впровадження сучасних методів стабілізації параметрів хитавиці судна та систем її управління, дозволяє значно покращити техніко-економічні показники суден і мінімізувати вплив негативних факторів на їх експлуатацію.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Перші кроки до зниження негативного впливу хитавиці на морехідні якості судна, роблять уже на етапі його конструювання. Розробляється карго-план (завантажувальний план судна) [1,2]. Основні вимоги до карго-плану є не лише утримання судна в рівноважному стані, а й регулювання остійності та забезпечення оптимальних параметрів хитавиці, що виникає на хвилюванні.

При цьому максимально зменшується площа ватерлінії, допустиме значення якої впливає з типу, конструкції та експлуатаційних характеристик судна [1,3].

Знання штормових діаграм районів плавання здатне де що поліпшити умови руху судна, але все ж недостатньо для повного усунення негативного впливу хитавиці.

Також розробляються певні конструкційні елементи [4-6], основна задача яких направлена на зменшення збуджуваних моментів, а разом із тим кутів відхилення судна від рівноважного стану та прискорень елементів конструкції судна. Такі конструкційні елементи називаються заспокійники хитавиці. Їхній принцип роботи дещо схожий – створюється момент, протидіючий збуджувачому моменту, що виникає при хитавиці. Але слід зазначити, що заспокійники хитавиці мало ефективні для всіх типів хитавиці, крім бортової. До зменшення максимального кута крену бортової хитавиці, приведе використання вилічних кілів [4,5] і встановлення бортових керованих керм [6]. Дані конструкційні рішення мало ефективні при відсутності руху судна. Достатньо ефективно впровадження гіроскопів, в якості заспокійників хитавиці [7,8], але практично застосовуються не часто, в результаті економічної недоцільності.

Достатньо ефективним засобом, для боротьби з бортовою хитавицею судна є пасивні та активні цистерни [9,10]. Основний принцип роботи таких цистерн заснований на переміщенні водяних мас між цистернами, що знаходяться на кожному борті судна. Ефективність роботи пасивних цистерн спостерігається при резонансній хитавиці, а активні цистерни можливо успішно використовувати при різних частотах коливань.

Керування напрямком руху водяних мас в пасивних цистернах відсутнє, а в активних цей рух можливо успішно коригувати за допомогою компресора у повітряному каналі або гідравлічного насоса у рідинному. При цьому постає завдання їх роботи при зміні зовнішніх умов. Для вирішення цього завдання пропонується використання апарату нечіткої логіки [11,12], що дозволяє ефективно керувати перерозподілом рідини навіть за постійно змінних зовнішніх параметрів завдяки відсутності чітких значень вхідних змінних у її математичній моделі.

В [13], нами було продемонстровано застосування такої моделі, але модель враховувала значення кута крену і кутової швидкості руху судна не аналізуючи напрямку вектору кутового переміщення при бортовій хитавиці. І хоча застосування даної моделі [13] призведе до зменшення кута крену, настання рівноважного стану судна вкрай ускладнене, так як за інерцією судно пройде цей стан. Врахування в моделі напрямку вектора кутового переміщення здатне виправити цей недолік.

Формулювання мети дослідження

Розробка математичної моделі керування станом руху судна при бортовій хитавиці, на основі математичного апарату нечіткої логіки, з врахуванням напрямку вектора кута крену.

Викладення основного матеріалу дослідження

В роботі [13], нами була продемонстрована математична модель керування роботою клапанів для стабілізації руху судна при бортовій хитавиці на базі нечіткої логіки. При цьому алгоритм керування роботою клапанів включав стабілізацію руху судна при відхиленні його від положення рівноваги і не враховував напрямок обертання судна навколо повздовжньої осі обертання при бортовій хитавиці. В результаті дана модель призведе до проходження положення рівноваги і відхилення судна в іншу сторону від цього положення. При цьому очевидно, що час протягом якого судно опиниться в положенні рівноваги, буде далекий від оптимального.

Для усунення цього недоліку пропонується в математичній моделі врахувати напрямок вектора кута крену, тобто напрямок обертання судна. При цьому буде суттєво змінюватися ступінь відкриття клапана, а також почерговість їх включення. Головний аспект експертної оцінки полягає в тому, що при наближенні судна до стану рівноваги зменшується ступінь відкриття клапана, а при певних значеннях кута крену та кутової швидкості потрібно відкрити клапан, що знаходиться в протилежній частині судна.

Система управління базується на базі правил нечіткої логіки з використанням алгоритму нечіткого висновку Мамдані-Заде. Розглядається управління креном судна в одному напрямку, оскільки його поведінка в різних напрямках є симетричною.

Структурна схема системи Мамдані-Заде (рис. 1) та база правил вхідних лінгвістичних змінних не відрізняється від структурної схеми в роботі [13], а база правил вхідних та вихідних лінгвістичних змінних зміниться з врахуванням напрямку обертання судна, тобто напрямку зміни кутового переміщення.

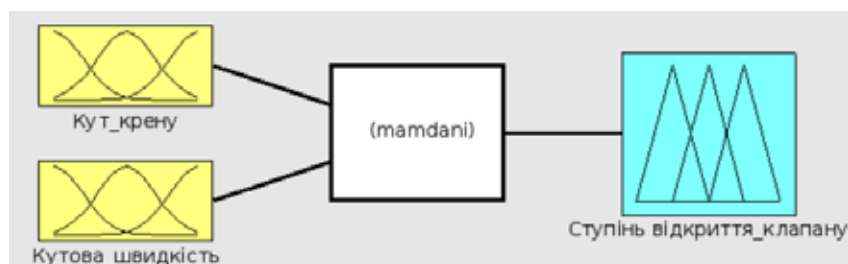


Рис. 1. Структурна схема системи Мамдані-Заде

В даній моделі вхідними лінгвістичними змінними є кут крену, вектор кута крену та кутова швидкість судна при бортовій хитавиці, а вихідною лінгвістичною змінною є ступінь відкритості клапана.

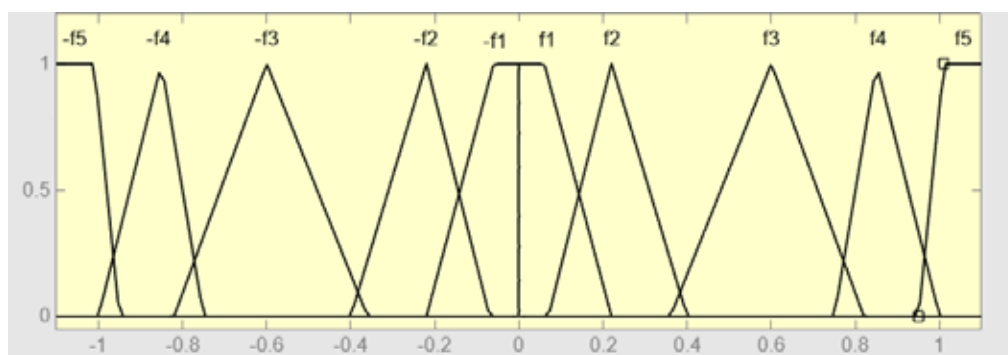


Рис. 2. Функція належності: кут крену

На рисунку 2 графічно показані терми вхідної лінгвістичної змінної кут крену. Позитивні значення кута крену відповідають стану судна, коли воно віддаляється від положення рівноваги. Від'ємні значення кута крену відповідають такому стану судна, коли воно повертається до положення рівноваги і вектор кута крену змінюється на протилежний.

На рисунку 3 показані значення термів лінгвістичної змінної кутова швидкість. При цьому значення термів вхідних лінгвістичних змінних показані в відносних одиницях [13].

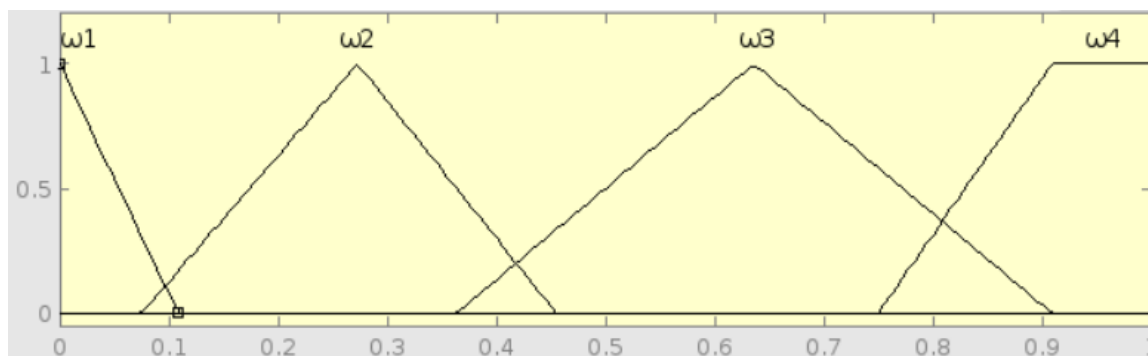


Рис. 3. Функція належності: кутова швидкість

Терми вихідної лінгвістичної змінної представлені графічно на рисунку 4. Де позитивні значення Q відповідають роботі клапана насоса, який знаходиться в тій частині судна, яка занурюється в воду при бортовій хитавиці, а від’ємні значення Q відповідають роботі клапана насоса, що знаходиться в протилежній частині судна.

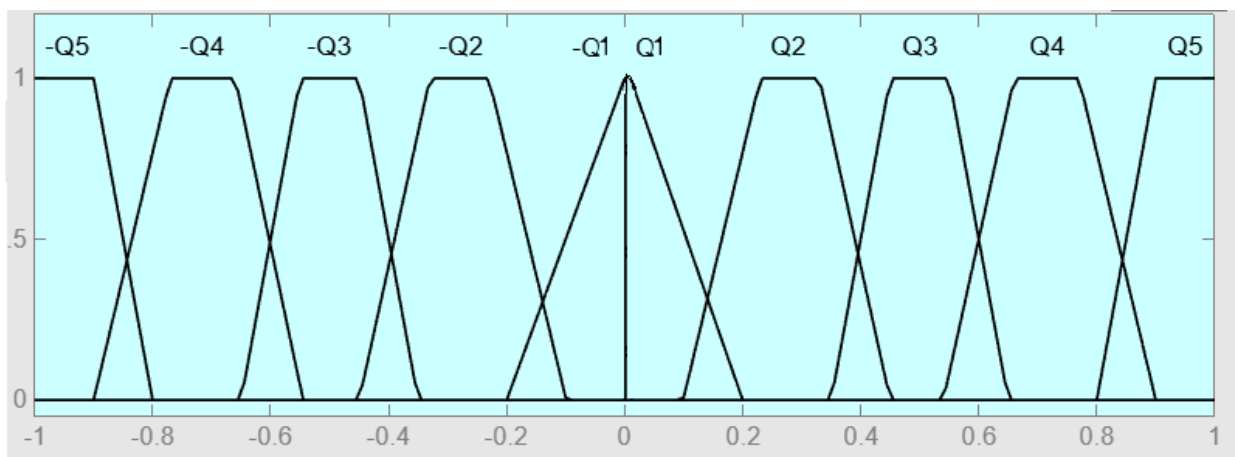


Рис. 4. Функція належності: ступінь відкриття клапана

Згідно експертної оцінки сформована база правил лінгвістичних змінних (табл. 1). Правила 1-20 аналогічні роботі [13], правила 21-40 враховують зміну напрямку вектора кута крену при русі судна до положення рівноваги.

Таблиця 1

База правил лінгвістичних змінних

1.	If (f is f1) and (ω is ω1) then (Q is Q1)
2.	If (f is f1) and (ω is ω2) then (Q is Q2)
3.	If (f is f1) and (ω is ω3) then (Q is Q3)
4.	If (f is f1) and (ω is ω4) then (Q is Q3)
5.	If (f is f2) and (ω is ω1) then (Q is Q2)
6.	If (f is f2) and (ω is ω2) then (Q is Q3)
7.	If (f is f2) and (ω is ω3) then (Q is Q3)
8.	If (f is f2) and (ω is ω4) then (Q is Q4)
9.	If (f is f3) and (ω is ω1) then (Q is Q2)
10.	If (f is f3) and (ω is ω2) then (Q is Q3)
11.	If (f is f3) and (ω is ω3) then (Q is Q4)
12.	If (f is f3) and (ω is ω4) then (Q is Q5)
13.	If (f is f4) and (ω is ω1) then (Q is Q3)
14.	If (f is f4) and (ω is ω2) then (Q is Q4)
15.	If (f is f4) and (ω is ω3) then (Q is Q5)
16.	If (f is f4) and (ω is ω4) then (Q is Q5)
17.	If (f is f5) and (ω is ω1) then (Q is Q3)
18.	If (f is f5) and (ω is ω2) then (Q is Q5)

Закінчення табл. 1

19.	If (f is f5) and (ω is $\omega3$) then (Q is Q5)
20.	If (f is f5) and (ω is $\omega4$) then (Q is Q5)
21.	If (f is -f1) and (ω is $\omega1$) then (Q is -Q1)
22.	If (f is -f1) and (ω is $\omega2$) then (Q is -Q2)
23.	If (f is -f1) and (ω is $\omega3$) then (Q is -Q3)
24.	If (f is -f1) and (ω is $\omega4$) then (Q is -Q4)
25.	If (f is -f2) and (ω is $\omega1$) then (Q is Q1)
26.	If (f is -f2) and (ω is $\omega2$) then (Q is -Q1)
27.	If (f is -f2) and (ω is $\omega3$) then (Q is -Q1)
28.	If (f is -f2) and (ω is $\omega4$) then (Q is -Q3)
29.	If (f is -f3) and (ω is $\omega1$) then (Q is Q2)
30.	If (f is -f3) and (ω is $\omega2$) then (Q is Q1)
31.	If (f is -f3) and (ω is $\omega3$) then (Q is Q1)
32.	If (f is -f3) and (ω is $\omega4$) then (Q is -Q1)
33.	If (f is -f4) and (ω is $\omega1$) then (Q is Q3)
34.	If (f is -f4) and (ω is $\omega2$) then (Q is Q2)
35.	If (f is -f4) and (ω is $\omega3$) then (Q is Q1)
36.	If (f is -f4) and (ω is $\omega4$) then (Q is Q1)
37.	If (f is -f5) and (ω is $\omega1$) then (Q is Q4)
38.	If (f is -f5) and (ω is $\omega2$) then (Q is Q3)
39.	If (f is -f5) and (ω is $\omega3$) then (Q is Q2)
40.	If (f is -f5) and (ω is $\omega4$) then (Q is Q2)

Графічно отримана поверхня відклику роботи клапанів насосів на основі бази правил вхідних і вихідної лінгвістичної змінної для стабілізації параметрів руху судна при бортовій хитавиці, де в якості заспокійника хитавиці виступають активні цистерни (рис. 5).

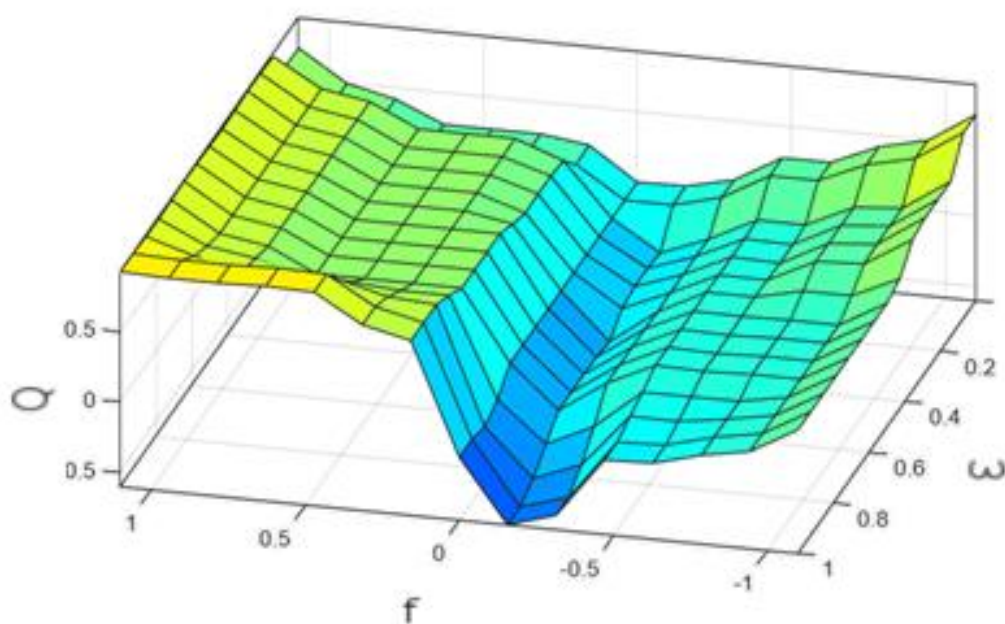


Рис. 5. Поверхня відклику управління ступенем відкриття клапанів

Висновки

Запропоновано математичну модель алгоритму керування параметрами судна при бортовій хитавиці, на базі нечіткої логіки в середовищі Matlab Simulink з розширенням Fuzzy Logic Toolbox.

На основі даної математичної моделі, що базується на значеннях термів вхідних лінгвістичних змінних – кута крену, напрямку вектора кута крену, кутової швидкості та термах вихідної лінгвістичної змінної – ступеня відкриття клапана, отримано поверхню відклику управління ступенем відкриття клапана при використанні в якості заспокійника хитавиці активних цистерн.

Застосування математичної моделі на базі нечіткої логіки дає можливість покращити характеристики руху судна – зменшити кут крену судна при бортовій хитавиці, кутову швидкість, прискорення елементів корпусу судна та зменшити час переходу судна в рівноважний стан при відхиленні від нього в результаті зовнішніх збурень.

Список використаної літератури

1. Misra, S.C. Design Principles of Ships and Marine Structures. CRC Press, 2016. 474 p.
2. Кротов О.І., Голяков В.І., Єганов О.Ю., Бондаренко О.В. Проектування морських транспортних суден. Миколаїв: УДМТУ, 2003. 156 с.
3. Корніюк, В. Я., Кубіцький, Р. О., Буга, А. О., Москаленко, К. С. Забезпечення безпеки плавання судна на хвилюванні. *Морська безпека та оборона*, 2024. № 1. с. 23-35. <https://doi.org/10.32782/msd/2024.1/04>
4. В.М Shameem. CFD Analysis and Experimental Validation on the Effectiveness of Bilge Keel as a Roll Stabilizer. *International Journal of Computational Engineering Research (IJCER)*, 2018. V. 08. I. 8. p.8-12.
5. Hasan Islam Copuroglu, Emre Peşman, Toru Katayama. Experimental and numerical investigation on the influence of bilge keel shape on roll damping. *Marine Structures*, 2025, V. 100. p. 103725. <https://doi.org/10.1016/j.marstruc.2024.103725>
6. L. Liang, Q. Cheng, P. Cai, J. Li, Z. Le and Y. Jiang, Research of Combined Rudder and Fin Stabilizer Control Strategy for Ship. *International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA)*, Harbin, Heilongjiang, China, 2023. pp. 49-54. doi: 10.1109/ICMA57826.2023.10215670
7. Lifen Hu, Ming Zhang, Gang Li, Zhiming Yuan, Junying Bi, Yanli Guo. Multi-objective model predictive control for ship roll motion with gyrostabilizers. *Ocean Engineering*, 2024. V. 313(12). pp. 119412. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.119412>
8. Ribeiro e Silva, Varela J.M. Ship Gyroscopic Roll Stabilisation. *Proceedings of the ASME 2022 41st International Conference on Ocean*, 2022. V. 5B. p.18. <https://doi.org/10.1115/OMAE2022-79530>
9. Osama A. Marzouk, Ali H. Nayfeh. Control of ship roll using passive and active anti-roll tanks. *Ocean Engineering*, 2009. V. 36. I. 9–10, pp. 661-671. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2009.03.005>
10. M. Haro, R. Ferreiro F. J. Velasco. Ship's roll stabilization by anti-roll active tanks. *Oceans 2011 IEEE*, Spain, Santander, 2011. pp. 1-10. doi:10.1109/Oceans-Spain.2011.6003385
11. Граф, М. С., Свінцицька, О. М., Артамонов, Є. Б. Нечітке моделювання для аналізу та прогнозування в складних інформаційних системах. *Технічна інженерія*, 2024. № 1(93). С. 139–146. [https://doi.org/10.26642/ten-2024-1\(93\)-139-146](https://doi.org/10.26642/ten-2024-1(93)-139-146)
12. Лебедь О.М. Оцінка якості роботи напівпровідникового перетворювача частоти судового електротехнічного комплексу на базі нечіткої логіки. Вісник Херсонського національного технічного університету, 2025. № 2(92), Т1. С. 125-130. <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.2.1.16>
13. Лебедь О.М., Лебедь Н.І. Керування параметрами хитавиці судна на основі активних цистерн з використанням математичного апарату нечіткої логіки. Вісник Херсонського національного технічного університету, 2025. № 2(92), Т1. С. 131-136. <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.2.1.17>

References

1. Misra, S.C. (2016). Design Principles of Ships and Marine Structures. CRC Press, 474 p.
2. Krotov O.I., Holikov V.I., Yehanov O.Iu., Bondarenko O.V. (2003). Proektuvannia morskykh transportnykh suden [Design of marine transport vessels]. Mykolaiv: UDMTU, 156 p. [in Ukrainian].
3. Korniiuk, V. Ya., Kubitskyi, R. O., Buha, A. O., Moskalenko, K. S. (2024). Zabezpechennia bezpeky plavannia sudna na khvyliuvanni [Ensuring the safety of a vessel sailing in rough seas]. *Morska bezpeka ta oborona*, no. 1. pp. 23-35. [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.32782/msd/2024.1/04>
4. В.М Shameem. (2018). CFD Analysis and Experimental Validation on the Effectiveness of Bilge Keel as a Roll Stabilizer. *International Journal of Computational Engineering Research (IJCER)*, V. 08. I. 8. p.8-12.
5. Hasan Islam Copuroglu, Emre Peşman, Toru Katayama. (2025). Experimental and numerical investigation on the influence of bilge keel shape on roll damping. *Marine Structures*, V. 100. p. 103725. <https://doi.org/10.1016/j.marstruc.2024.103725>
6. L. Liang, Q. Cheng, P. Cai, J. Li, Z. Le and Y. Jiang, (2023). Research of Combined Rudder and Fin Stabilizer Control Strategy for Ship. *International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA)*, Harbin, Heilongjiang, China, pp. 49-54. doi: 10.1109/ICMA57826.2023.10215670
7. Lifen Hu, Ming Zhang, Gang Li, Zhiming Yuan, Junying Bi, Yanli Guo. (2024). Multi-objective model predictive control for ship roll motion with gyrostabilizers. *Ocean Engineering*, V. 313(12). pp. 119412. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.119412>
8. Ribeiro e Silva, Varela J.M. (2022). Ship Gyroscopic Roll Stabilisation. *Proceedings of the ASME 2022 41st International Conference on Ocean*, V. 5B. p.18. <https://doi.org/10.1115/OMAE2022-79530>

9. Osama A. Marzouk, Ali H. Nayfeh. (2009). Control of ship roll using passive and active anti-roll tanks. *Ocean Engineering*, V. 36. I. 9–10, pp. 661-671. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2009.03.005>
10. M. Haro, R. Ferreiro F. J. Velasco. (2011). Ship's roll stabilization by anti-roll active tanks. *Oceans 2011 IEEE*, Spain, Santander, pp. 1-10. doi:10.1109/Oceans-Spain.2011.6003385
11. Hraf, M. S., Svintsytska, O. M., Artamonov, Ye. B. (2024). Nechitke modeliuвання dlia analizu ta prohnozuvannya v skladnykh informatsiinykh systemakh [Fuzzy modeling for analysis and prediction in complex information systems]. *Tekhnichna inzheneriia*, no. 1(93). pp. 139–146. [in Ukrainian]. [https://doi.org/10.26642/ten-2024-1\(93\)-139-146](https://doi.org/10.26642/ten-2024-1(93)-139-146)
12. Lebed O.M. (2025). Otsinka yakosti roboty napivprovodnykovoho peretvoriuvacha chastoty sudnovoho elektrotekhnichnoho kompleksu na bazi nechitkoi lohiky. [Evaluation of the quality of the work of a semiconductor frequency converter of a ship electrical complex based on fuzzy logic]. *Visnyk Khersonskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu*, no. 2(92), V. 1. pp. 125–130. [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.2.1.16>
13. Lebed O.M., Lebed N.I. (2025). Keruvannya parametramy khytavytsi sudna na osnovi aktyvnykh tsystem z vykorystanniam matematychnoho aparatu nechitkoi lohiky. [Control of ship roll parameters based on active tanks using the mathematical apparatus of fuzzy logic.]. *Visnyk Khersonskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu*, no. 2(92), V. 1. pp. 131–136. [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.2.1.17>

Дата першого надходження статті до видання: 15.02.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 20.03.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 07.05.2026