УДК 629.12, 681.52 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.2.1.17

О. М. ЛЕБЕДЬ
кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри природничо-наукової підготовки
Херсонська державна морська академія
ORCID: 0000-0001-5603-9244

Н. І. ЛЕБЕДЬ
викладач
Відокремлений структурний підрозділ «Морський фаховий коледж
Херсонської державної морської академії»
ORCID: 0009-0009-4539-2988

КЕРУВАННЯ ПАРАМЕТРАМИ ХИТАВИЦІ СУДНА НА ОСНОВІ АКТИВНИХ ЦИСТЕРН З ВИКОРИСТАННЯМ МАТЕМАТИЧНОГО АПАРАТУ НЕЧІТКОЇ ЛОГІКИ

Одним з найпоширеніших негативних явищ, яке впливає на мореходні якості судна, є хитавиця. Хитавиця виникає під дією змінних зовнішніх факторів і достатньо суттєво впливає на умови руху судна. Змінюється робота пропульсивної установки, збільшується опір руху судна, негативний фізіологічний вплив на людський організм. Найбільш негативними наслідками хитавиці є брочінг, слемінг, параметричний резонанс. В окремих випадках хитавиця може призвести до гибелі судна.

В даній роботі проаналізовані основні методи і способи стабілізації руху судна. Зазначено, що характеристики стабілізації руху судна починають нормуватися на етапах проектування судна, одними з основних аспектів якого є розробка технічних планів завантаження. Також для певних типів суден знижують площу ватерлінії і тим самим зменшують значення збуджуючих хитавицю моментів сил. Використання штормових діаграм при виборі певних режимів руху, може суттєво зменшити негативний вплив хитавиці.

Розглянуто основні типи стабілізаторів пасивного та активного типу, які використовують на судноплавстві. До них відносяться величні кілі, бортові керовані керма, гіроскопічний стабілізатор, пасивні та активні цистерни. Величні кілі і бортові керовані керма обмежені конструкцією судна і мало ефективні при малих швидкостях руху. Гіроскопічні стабілізатори окрім високої маси і габаритів виділяються своєю дорожнечею, що обмежує їх технічне використання. Пасивні цистерни ефективні лише при резонансній хитавиці. При цьому активні цистерни зменшують амплітуду хитавиці при різних частотах. Основна проблема активних цистерн – це складна система управління їх роботою в зовнішніх умовах, що постійно змінюються.

На основі математичного моделювання, з використанням апарату нечіткої логіки Matlab Simulink з розширенням Fuzzy Logic Toolbox, розроблено систему управління роботою клапанів компресорів для зменшення негативного впливу хитавиці на мореходні якості судна. Продемонстровано функції належності вхідних та вихідної лінгвістичних змінних.

Ключові слова: *хитавиця судна, заспокоювач хитавиці, нечітка логіка, Matlab Simulink, Fuzzy Logic Toolbox.*

O. M. LEBED
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Natural Sciences
Kherson State Maritime Academy
ORCID: 0000-0001-5603-9244

N. I. LEBED
Lecturer
Separated Structural Unit “Maritime Applied College
of Kherson State Maritime Academy”
ORCID: 0009-0009-4539-2988

CONTROL OF SHIP ROLLING PARAMETERS BASED ON ACTIVE TANKS USING THE MATHEMATICAL APPARATUS OF FUZZY LOGIC

One of the most common negative phenomena affecting the seaworthiness of a vessel is pitching. Pitching occurs under the influence of variable external factors and significantly affects the conditions of the vessel’s movement. The operation of the propulsion system changes, the resistance to the vessel’s movement increases, and there is a negative physiological

effect on the human body. The most negative consequences of pitching are broaching, slamming, and parametric resonance. In some cases, pitching can lead to the death of the vessel.

This paper analyzes the main methods and techniques for stabilizing the movement of a vessel. It is noted that the characteristics of stabilizing the movement of a vessel begin to be standardized at the stages of designing a vessel, one of the main aspects of which is the development of technical loading plans. Also, for certain types of vessels, the waterline area is reduced, thereby reducing the value of the moments of force that excite pitching. The use of storm diagrams when choosing certain movement modes can significantly reduce the negative impact of pitching.

The main types of passive and active stabilizers used in shipping are considered. These include bilge keels, side steerable rudders, gyroscopic stabilizers, passive and active tanks. Bile keels and side steerable rudders are limited by the vessel design and are not very effective at low speeds. Gyroscopic stabilizers, in addition to their high weight and dimensions, are distinguished by their high cost, which limits their technical use. Passive tanks are effective only with resonant pitching. At the same time, active tanks reduce the pitching amplitude at different frequencies. The main problem with active tanks is the complex control system for their operation in constantly changing external conditions. Based on mathematical modeling, using the fuzzy logic apparatus Matlab Simulink with the Fuzzy Logic Toolbox extension, a control system for the operation of compressor valves has been developed to reduce the negative impact of pitching on the seaworthiness of a vessel. Membership functions of input and output linguistic variables are demonstrated.

Key words: *ship roll, roll stabilizer, fuzzy logic, Matlab Simulink, Fuzzy Logic Toolbox.*

Постановка проблеми

Суттєвим фактором, що впливає на мореxідні якості судна є його хитавиця. Хитавиця здатна призвести до негативних наслідків і катастроф, вона впливає на швидкісні та маневрові параметри судна. При цьому можлива повна втрата керованості судна, падіння остійності.

До негативних наслідків хитавиці можна також віднести деформації елементів судна під дією знакозмінних навантажень, які є наслідком не лише постійної зміни параметрів хитавиці, а й того, що при хитавиці різні частини судна мають різні прискорення. Прискорення верхніх частин корпусу судна мають значно вищі значення, так як вони за однаковий час проходять більші відстані. Наявність сил інерції та гіроскопічних сил також призводить до дестабілізації руху судна.

Однозначний негативний фізіологічний вплив хитавиці судна на людський організм, що перш за все полягає впливом на вестибулярний апарат людини. Усунення цього впливу за рахунок фармакологічних засобів не завжди призводить до позитивних наслідків.

Найбільш небезпечними негативними явищами, які можуть призвести до загибелі судна є слемінг, брочинг, параметричний резонанс.

Застосування методів стабілізації хитавиці судна та способів її управління покращують його техніко-економічні характеристики.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Заходи, які використовують для зменшення амплітуди хитавиці, починають на етапі проектування судна. Одним з головних чинників є розробка планів завантаження судна, так званий карго-план. Таким чином регулюється остійність судна для отримання оптимальних значень амплітуди та періоду хитавиці [1, 2]. Також при конструюванні, здебільшого для круїзних лайнерів, зменшують площу ватерлінії [2, 3]. Це призводить до суттєвого зниження значень збуджуючих моментів і відповідно зменшення амплітуди хитавиці.

Зменшити негативний вплив хитавиці також можна за рахунок використання штормових діаграм. Дані діаграми ґрунтуються, перш за все, на погодних умовах районів плавання і дозволяють вибрати оптимальний курс і швидкість корабля [3]. Даних прийомів, зазвичай буває недостатньо і для стабілізації руху судна використовують спеціальні пристрої – заспокійники хитавиці. Загальний їх принцип дії полягає у створенні моменту, який протидіє збуджуючому хитавицю моменту. При цьому заспокійники хитавиці на реальних суднах, застосовують лише для бортової хитавиці, так як для інших типів хитавиці вони малоефективні.

Суттєво зменшити амплітуду коливань бортової хитавиці вдається за рахунок застосування виличних кілів [4, 5], встановлення бортових керованих керм [6]. Стабілізуюча дія цих механізмів найбільше проявляється при русі судна. Основний їх недолік – мала ефективність при відсутності руху судна.

Одним з найбільш ефективних заспокійників хитавиці є гіроскопічні стабілізатори [7, 8], застосування яких в окремих випадках, здатне повністю погасити хитавицю. Однак сфера застосування їх достатньо обмежена з-за складності конструкції та експлуатації, великої маси та габаритних розмірів, великої вартості обладнання.

Також, в якості заспокійника хитавиці, використовують пасивні та активні цистерни. Пасивні цистерни ефективні лише при резонансній хитавиці і мало застосовуються, так як при нерезонансних умовах можуть призвести навіть до збільшення амплітуди хитавиці. Активні ж цистерни здатні ефективно працювати при різних умовах, створюючи стабілізуючий момент при різних частотах [9, 10].

В активних цистернах, для перерозподілу рідини між цистернами, використовують компресор в повітряному каналі або гідравлічний насос в рідинному. При цьому, в залежності від зовнішнього хвилювання, настає

необхідність управляти роботою компресора чи насоса. Для управлінням перерозподілу рідини між цистернами, при постійно змінних зовнішніх умовах, слід використовувати апарат нечіткої логіки, в якій при побудові математичної моделі вхідні змінні не мають чіткого значення [11].

Формулювання мети дослідження

Створення математичної моделі управління бортовою хитавицею судна активними цистернами на базі нечіткої логіки.

Викладення основного матеріалу дослідження

Основний рушій роботи активних цистерн є вода. Активні цистерни розташовуються по бортам судна з'єднані між собою певними каналами. Компресор, за допомогою стисненого повітря, перекачує воду з однієї цистерни в іншу, в залежності від кута крену і кутової швидкості судна. Значення кута крену і кутової швидкості фіксуються кренометром та датчика кутової швидкості. Основна задача управління хитавицею судна не допустити великих амплітуд і повернути судно в стан рівноваги.

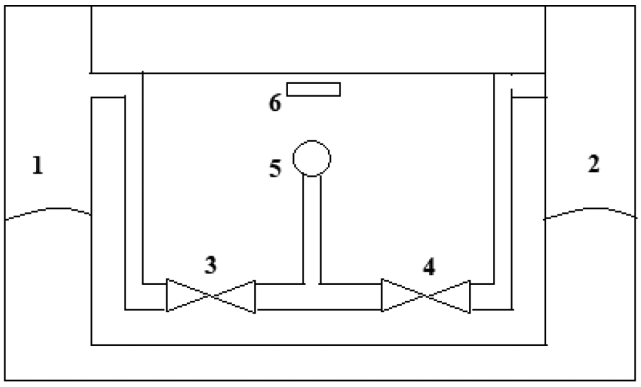

Рис. 1. Схема стабілізації судна активними цистернами

Схема процесу стабілізації судна за допомогою активних цистерн зображена на рис. 1. Бортові цистерни 1 і 2, з'єднані в нижній частині каналом, а у верхній – повітряним трубопроводом.

Подача повітря від компресора 5 регулюється автоматичними клапанами 3 і 4. Модель нечіткої системи управління заспокоювачем хитавиці судна, ґрунтуючись на показаннях кренометра 6, таких як кут крену f і розрахованої кутової швидкості ω, формує керуючий сигнал на клапана 3 і 4 з метою забезпечити оптимальну затримку переливу рідини.

В якості системи управління використовується нечітка логіка, алгоритм нечіткого виводу Мамдані-Заде. Розглянуто систему управління для крену судна в одному напрямку, так як крен судна в різних напрямках симетричний.

На рисунку 1 приведена схема розробленої системи в середовищі Matlab Simulink з розширенням Fuzzy Logic Toolbox.

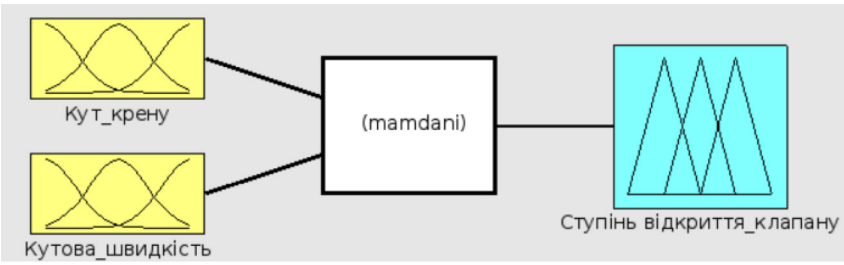

Рис. 2. Структурна схема системи Мамдані-Заде

Вхідні лінгвістичні змінні – кут крену і кутова швидкість, вихідна лінгвістична змінна – ступінь відкритості клапана.

На рисунках 3–4 графічно показано терми вхідних лінгвістичних змінних. Лінгвістична змінна «кут крену» має терми: f_1, f_2, f_3, f_4, f_5 (рис. 3). Лінгвістична змінна «кутова швидкість» має терми: ω_1, ω_2, ω_3, ω_4. Значення термів визначено в відносних одиницях, по відношенню до максимальних значень кутів крену і кутової швидкості, номінальні параметри яких рівні 1.

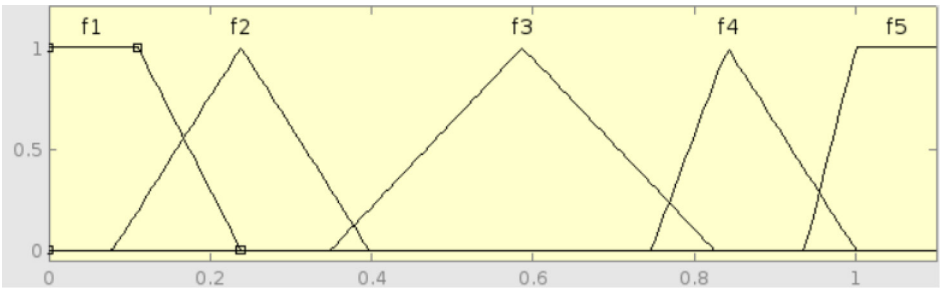

Рис. 3. Функція належності: кут крену

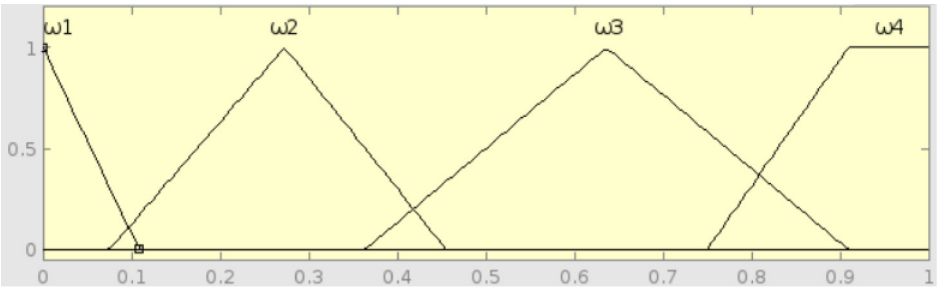

Рис. 4. Функція належності: кутова швидкість

Вихідна лінгвістична змінна «ступінь відкриття клапана» має терми: Q_1, Q_2, Q_3, Q_4, Q_5. Вона регулює подачу повітря від насосу для витіснення води в ту чи іншу цистерну. Ця лінгвістична змінна пробігає значення термів від закритого клапану, що відповідає значенню «0» до «1», що відповідає повністю відкритому клапану (рис. 5).

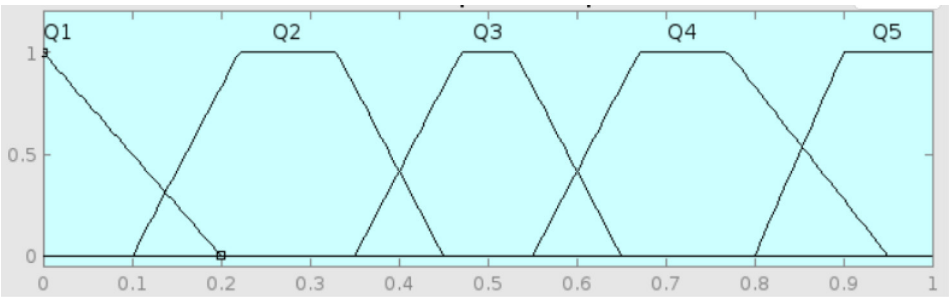

Рис. 5. Функція належності: ступінь відкриття клапана

Функція належності «ступінь відкритості клапана» має терми: закритий, трохи відкритий, наполовину відкритий, майже відкритий, відкритий.

Сформовано правила нечітких продукцій ступеня відкритості клапана (табл. 1).

На основі даних правил отримана поверхня нечіткого виводу управління ступенем відкритості клапана для регулювання параметрів хитавиці судна на основі активних цистерн (рис. 6).

Висновки

В середовищі Matlab Simulink з розширенням Fuzzy Logic Toolbox розроблена математична модель управління параметрами бортової хитавиці судна при використанні в якості заспокійників активних цистерн. Основою роботи даної математичної моделі є кількість і значення термів лінгвістичних змінних та їх база правил.

Таким чином можна стверджувати, що застосування апарату нечіткої логіки для керування роботою активних суднових цистерн, в якості заспокійника хитавиці, дає можливість знизити значення амплітуди хитавиці і покращити мореходні якості судна.

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)
19.	If (f is f5) and (ω is ω3) then (Q is Q5)
20.	If (f is f5) and (ω is ω4) then (Q is Q5)

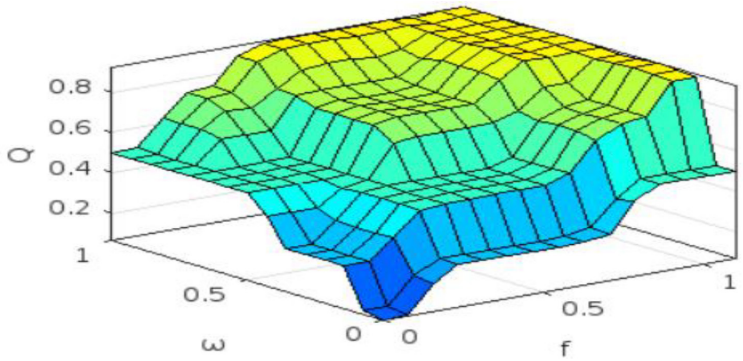

Рис. 6. Поверхня нечіткого виводу управління ступенем відкриття клапана

Список використаної літератури

1. Кротов О. І., Голіков В. І, Єганов О. Ю., Бондаренко О. В. Проектування морських транспортних суден. Миколаїв : УДМТУ, 2003. 156 с.

2. Misra, S. C. Design Principles of Ships and Marine Structures. CRC Press, 2016. 474 p.

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. 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

5. B. M. Shameem. CFD Analysis and Experimental Validation on the Effectiveness of Bilge Keel as a Roll Stabilizer. *International Journal of Computational Engineering Re search (IJCER)*, 2018. V. 08. I. 8. p. 8–12.

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. 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

8. 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

9. 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

10. 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

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

References

1. 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].

2. Misra, S.C. (2016). Design Principles of Ships and Marine Structures. CRC Press, 474 p.

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. 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

5. B. M 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.

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. 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

8. 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

9. 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

10. 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

11. Hraf, M. S., Svintsytska, O. M., Artamonov, Ye. B. (2024). Nechitke modeliuvannia dlia analizu ta prohnozuvannia 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