

Войченко Т.О.

Дунайський інститут водного транспорту
Державного університету інфраструктури та технологій

Шевченко А.П.

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

МЕТОДИКА НЕЧІТКОЇ ОЦІНКИ РИЗИКІВ ТА КОНТРОЛЮ РУЛЬОВИМ УПРАВЛІННЯМ РУХОМ СУДНА

Метою статті є розробка методики нечіткої оцінки ризиків та контролю рульовим управлінням рухом судна на основі функції приналежності нечіткої множини станів, яка пов'язана з ризиканням судна. Поставлена мета досягається шляхом оцінювання безпеки мореплавства в різних аспектах, зокрема в оцінці якості управління судном відносно заданого курсу. Визначено, що функція приналежності для процесу управління рульовим рухом може бути встановлена шляхом застосування логічних рішень або статистичних оцінок, які базуються на аналізі курсових діаграм, отриманих в результаті управління судном рульовими з різним ступенем підготовки та індивідуальними якостями. Запропоновані представлення функції приналежності у вигляді лінійного розподілу; величина похибки утримання судна на курсі рульового визначена як сумарна похибка цих двох стандартних помилок; запропоновано використання двопараметричного елемента альтернатив нечіткої множини, що визначена лінгвістичним термом, при оцінці якості рульового управління; визначено, що мета контролю якості курсу судна є нечіткою, і може бути представлена як нечіткий набір альтернатив з функцією приналежності, яка визначається корисністю ризику для відносного значення безпеки ризикання на курсі. Загальна оцінка похибки утримання судна на курсі рульового визначається як сума двох незалежних стандартних помилок: похибки спрямованого показника (компаса), використовуваного рульовим, та особистої якості рульового в управлінні судном. Найбільш суттєвим результатом є визначення функції приналежності нечіткої множини станів, яка пов'язана з ризиканням судна під управлінням рульового. За допомогою даної функції можна визначити рівень оцінки безпеки за критерієм якості управління. Для визначення ризику утримання судна на курсі, що контролюється рульовим управлінням, необхідно розрахувати функцію ризику з оцінкою випадкового параметра ризику судна на курсі, враховуючи нечітку мету управління та створення обчислювального набору альтернатив. Рульовий може прийняти ризик тільки у разі, якщо ймовірний рівень безпеки не перевищує поріг неприйняттого значення.

Ключові слова: оцінка ризику, рульовий, якість управління, ризикання судна, нечітка множина, функція приналежності.

Постановка проблеми. Один з аспектів комплексної оцінки ризиків безпеки судна полягає в оцінці якості управління судном відносно заданого курсу. Це питання якості утримання судна за заданим курсом визначається поняттям «ризикання», яке складається з об'єктивної стійкості судна, зумовленої його конструкцією, та суб'єктивної здатності капітана впливати на стійкість

та маневреність судна через рульове управління рухом.

Управління рухом судна в напрямку, встановленому капітаном, є обов'язковою умовою. Однак, у реальних умовах навігації, судно піддається впливу багатьох змінних випадкових факторів, таких як сила тяги двигуна, сила, що діє на руль, вітер, хвилі та течії, тому необхідне постійне

регулювання керма та його зміщення для утримання судна на заданій траєкторії.

Одним з підходів до визначення ризику утримання судна на курсі, що контролюється рульовим управлінням, може бути використання функції ризику з оцінкою випадкового параметра ризику судна на курсі з урахуванням нечіткої мети управління та створення обчислювального набору альтернатив.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Багато вчених досліджують шляхи оцінки та контролю ризиків управління рухом суден, наприклад [1–6].

Так, у роботі [1] представлена розробка онлайн-моделей ризику, які можна оновлювати при зміні умов, використовуючи ризик як одну з метрик для контролю автономного судна в експлуатації. Ця стаття розширює та інтегрує системний теоретичний аналіз процесів та байєсівські мережі правдоподібності з системами управління автономними суднами, щоб забезпечити контроль ризиків нагляду. Метрика ризику використовується в контролері наглядового ризику (SRC), який при прийнятті рішень враховує як ризик, так й операційні витрати. Це дозволяє системі управління приймати кращі та більш обґрунтовані рішення, ніж існуючі системи управління суднами. Нова система управління була протестована в тематичному дослідженні, в якому SRC може визначати: які механічні системи активні; в якому режимі управління керувати судном; і якої швидкості слідувати. Система керування здатна вибрати оптимальний механізм, режим керування та орієнтир швидкості, щоб підтримувати безпечне керування судном на маршруті в мінливих умовах.

У роботі [2] визначено, що посадка судна на міліну є однією з основних проблем морського судноплавства і є наслідком помилки судноводія, технічної несправності життєво важливого суднового обладнання або форс-мажорних обставин. Для зменшення ризику посадки на міліну у таких випадках, у цій статті досліджується рух судна під час навігації, коли відбувається надзвичайна подія, така як відмова рульової системи, яка безпосередньо впливає на напрямок руху судна і опосередковано – на швидкість. Одним із способів визначення руху судна за таких обставин є моделювання руху судна на навігаційному тренажері відповідно до заздалегідь визначених сценаріїв, як пояснюється в цій статті. Всього було досліджено 60 сценаріїв, в процесі яких варіювалися тип і розмір судна, його швидкість і кут відхилення керма. Під час моделювання кожні 30 секунд записувалися всі необхідні дані про поточний рух судна та графічне відображення виконаної симу-

ляції. На основі результатів моделювання можна визначити найгірший сценарій, який може бути використаний для визначення наслідків посадки на міліну, одного з параметрів, необхідних для оцінки ризику посадки на міліну.

У роботі [4] зазначено, що прийняття високорівневих операційних рішень в інженерних системах, як правило, спирається на досвід і обізнаність людей-операторів, а також на їхнє розуміння взаємозв'язку між тим чи іншим рішенням і його впливом на безпеку експлуатації. Для забезпечення безпечного прийняття рішень комп'ютерними системами управління необхідно впроваджувати моделі, які встановлюють цей взаємозв'язок між можливими рішеннями і безпекою експлуатації. У цій статті демонструється, як за допомогою фреймворку модельного предиктивного керування можна розробити автономне прийняття рішень і керування з урахуванням ризиків, використовуючи фреймворк модельного предиктивного керування. При цьому враховується, що різні керуючі дії можуть впливати на безпеку, а також на експлуатаційні витрати, наприклад, з точки зору споживання палива або часових затримок. Мета полягає в тому, щоб дозволити системі управління виводити керуючі дії, які мінімізують експлуатаційні витрати і ризики. Для цього контролер може запускати симуляції контрольованого процесу, щоб оцінити майбутній вплив певного набору рішень на експлуатаційні витрати і безпеку, використовуючи змодельовані стани для оновлення моделі ризиків. Запропоновану структуру продемонстровано на прикладі автономного судна, де вибір режиму роботи машинної системи оптимізовано з точки зору споживання палива та ймовірності посадки на міліну. Результати моделювання показують, що запропонована концепція ризик-орієнтованих контролерів є здійсненою.

У статті проаналізовано два різних методи оцінки ймовірності зіткнення суден. Перший – це аналітичний підхід; відповідно, буде представлено огляд різних аналітичних виразів для оцінки кількості кандидатів на зіткнення для трьох основних ситуацій (зіткнення, обгін і перетин). Другий – імітаційний підхід: у доповіді буде представлено, як імітувати рухи суден, замінюючи їх колами, щоб отримати графічне представлення руху суден у зоні небезпеки, включаючи розрахунок кандидатів на зіткнення. Прикладна імітаційна модель також міститиме три основні ситуації: зіткнення, обгін і перетин, а результати імітаційного моделювання будуть порівнюватися з результатами аналітичних моделей. Результати та висновки повинні покращити існуючі моделі для отримання

потенційної кількості зіткнень суден і сприяти розробці нових прогресивних методів моделювання.

Але у відомій літературі відсутні дослідження щодо нечіткої оцінки ризиків та контролю рульовим управлінням рухом судна.

Постановка завдання. Метою статті є розробка методики нечіткої оцінки ризиків та контролю рульовим управлінням рухом судна на основі функції приналежності нечіткої множини станів, яка пов'язана з ризиканням судна.

Викладення основного матеріалу. У зв'язку з тим, що випадкові параметри (сила тяги двигуна, сила, що діє на руль, вітер, хвилі та течії) можуть впливати на процес утримання судна на заданому курсі G_n , це може призвести до утворення множини альтернативних значень Q_i ризикання судна, які відрізняються від номінального значення K_n внаслідок відхилення струму курсового параметра G_i . У такому випадку, рульове управління судном відповідає нечіткій контрольній меті \tilde{K} . Оскільки досягнення абсолютної близькості між G_n та заданим значенням G_i неможливе протягом тривалого періоду, випадковий параметр $Q_i = G_n - G_i$ використовується для визначення ризиків, що виникають при рульовому управлінні судном. Нечітка мета \tilde{K} визначає набір альтернатив $X = \{Q_i\}$, де Q_i належить універсальній множині N , а \tilde{K} відображає елементи цього набору альтернатив з функцією приналежності $\mu_{\tilde{K}}(Q_i)$ [7]:

$$\tilde{K} = \{Q_i, \mu_{\tilde{K}}(Q_i)\}, Q_i \in N. \quad (1)$$

Функція приналежності $\mu_{\tilde{K}}(Q_i)$ для процесу управління рульовим рухом може бути встановлена шляхом застосування логічних рішень або статистичних оцінок, які базуються на аналізі курсових діаграм, отриманих в результаті управління судном рульовими з різним ступенем підготовки та індивідуальними якостями. Цей аналіз

дає можливість визначити статистичні моменти, які враховують як особистісні якості капітана та об'єктивні зовнішні умови, так і закономірності в розподілі рахункового елемента Q_i . За допомогою цих статистично стійких параметрів множини альтернатив Q_i можна визначити функцію приналежності $\mu_{\tilde{K}}(Q_i)$, що виявляється у відхиленнях поточного значення курсового параметра G_i від номінального G_n .

Аналіз курсограм тривалістю у 30 діб із використанням до 20 рульових дозволів отримати статистичні оцінки ризику судна від управління рульовим, що дозволяє побудувати розподіл частот виникнення значень ризику відносно заданого курсу, який представлений на рис. 1.

З використанням апріорної інформації про принцип пропорційного управління, який використовує рульовий, та з урахуванням розподілу емпіричних даних, функцію приналежності $\mu_{\tilde{K}}(Q_i)$ можна подати у вигляді лінійного розподілу:

$$\mu_{\tilde{K}}(Q_i) = \frac{\Delta G_n - \sigma_Q}{\Delta G_n}, \quad (2)$$

де σ_Q – стандартне відхилення від заданого курсу при управлінні рульовим;

ΔG_n – задана норма максимального ризикання рульового.

Загальна оцінка похибки утримання судна на курсі рульового визначається як сума двох незалежних стандартних помилок: похибки спрямованого показника (компаса) σ_K , використовуваного рульовим, та особистої якості рульового σ_H в управлінні судном. Таким чином, величина похибки утримання судна на курсі рульового σ_Q визначається як сумарна похибка цих двох стандартних помилок:

$$\sigma_Q = \sqrt{\sigma_H^2 + \sigma_K^2}. \quad (3)$$

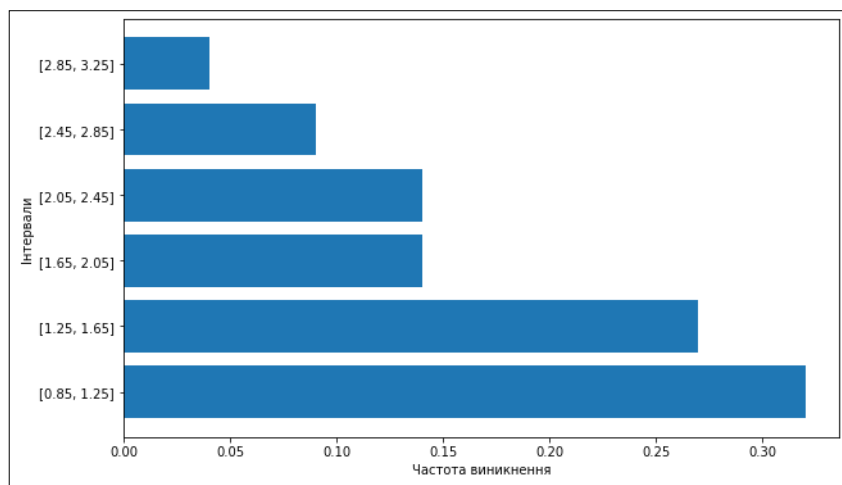


Рис. 1. Розподіл частот виникнення стандартних помилок управління рульовим

Якщо виразити значення σ_H з рівняння (3), то отримаємо значення помилки управління курсом рульового, яке можна оцінювати за допомогою коефіцієнта безпеки S_p , що відображає якість управління рульовим управлінням з урахуванням відносної величини наближення похибок управління до граничного значення відхилення від курсу, встановленого, наприклад, помічником вахти $-\Delta G_n$.

Проведений аналіз якості рульовим управлінням вказує на те, що рахункові елементи альтернатив Q_i містять значно більше інформації, якщо враховувати не тільки статичну складову управління, але й його параметри швидкості, зокрема частоту ризику W_{Q_i} . При цьому, для визначення зображення безпеки станів \tilde{K} , нечітка множина сформована на основі двовимірних елементів альтернатив з функцією приналежності $\mu_{\tilde{K}}(Q_i, W_{Q_i})$:

$$\tilde{K} = \{Q_i, W_{Q_i}, \mu_{\tilde{K}}(Q_i, W_{Q_i})\}, Q_i \in N. \quad (4)$$

Використання двопараметричного елемента альтернатив Q_i, W_i нечіткої множини, що визначена лінгвістичним термом, також дозволяє створити два статистичних класи на основі альтернативного терму «хороший» і «недостатньо хороший» рульовий, з лінійною дискримінантною функцією

$$d(Q_i, W_{Q_i}) = 0.476 - 3.5W_{Q_i} - 0.07Q_i. \quad (5)$$

У подальшому можна визначити оцінку величини приналежності до нечіткого набору граничного (критичного) S_k якості напрямку судна за курсом з умови «ідеального» управління рульовим (автокермом) у припущенні, що значення $\sigma_H = 0$. У цьому випадку, значення S_k буде визначатися за таким виразом:

$$S_k = \frac{\sigma_K}{\Delta G_n}. \quad (6)$$

Мета контролю якості курсу судна є нечіткою, і може бути представлена як нечіткий набір альтернатив з функцією приналежності, яка визначається корисністю ризику для відносного значення безпеки ризику на курсі. Таким чином, існує зв'язок між наявністю ризику та відсутністю інформації про якість управління, що призводить до високої ентропії та низького стану безпеки управління. Чим менше гарантій якості рульового управління, тобто безпеки, тим більше ризику.

За використання цього принципу можемо ввести коефіцієнт q , який описує зміну відносного значення безпеки dS/S_i відносно елементарної зміни рівня ризику dR , а саме:

$$q = \frac{dS}{S_i dR}, \quad (7)$$

де q – коефіцієнт пропорційності, який встановлює мінімальні припустимі значення безпеки контролю.

Значення введеного коефіцієнта пропорційності може бути інтерпретоване як коефіцієнт запасу міцності, тобто як відношення зміни безпеки до зміни ризику. Якщо розділити змінні та застосувати інтеграли для лівої та правої частин з врахуванням сталого коефіцієнта q , то можна отримати осмислене значення цього коефіцієнта

$$\int dR = k \int \frac{dS}{S}. \quad (8)$$

Після визначення інтегралу отримуємо

$$R = k \ln S + C, \quad (9)$$

де C – константа інтегрування, значення якої обумовлюється відповідними граничними умовами.

Залежно від відносної величини ризику рульового, що визначається значенням поточної безпеки S , можна визначити ступінь ризику рульового R . Остаточне рішення можна записати з використанням такого виразу:

$$R = k \ln S. \quad (10)$$

Для прийняття ризику необхідно враховувати принцип суб'єктивного очікування його корисності, що залежить від порогового рівня допустимості ризикового збитку, або порогу фатальної небезпеки. Рульовий може прийняти ризик тільки у тому випадку, якщо ймовірний рівень безпеки не перевищує поріг неприйнятності значення. При цьому, якщо поточний рівень безпеки не досягає граничних значень відхилень, що викликають фатальні наслідки, то може виникнути граничне рішення, при якому значення відносної величини показника ризику буде дорівнювати 1. Значення відносної величини, при якому значення ризику стає рівним 1, залежить від значення коефіцієнта k , що виступає як поріг фатальної небезпеки.

Використовуючи вираз (10), можна встановити значення коефіцієнта k для діапазону рівнів безпеки S з деякими граничними значеннями S_k , де S_k є мінімально-критичними або фатальними контрольними рівнями безпеки, де $1 > S_k > 0$. Коли значення безпеки S досягає цих мінімальних значень, ризик приймає значення $R = 1$. Отже, можна зазначити, що існує рішення для діапазону значень коефіцієнта k з граничними значеннями S_k , при яких ризик досягає значення $R = 1$, а саме:

$$k = \frac{1}{\ln S_k}. \quad (11)$$

Підставивши значення коефіцієнта k у вираз для оцінки функції ризику залежно від ступеня співвідношення поточних значень безпеки до їх граничних рівнів, отримуємо функцію приналежності до ризику

$$R = \frac{\ln S_t}{\ln S_k}, \quad (12)$$

де S_t – поточний рівень безпеки в мореплавстві для даного судна;

S_k – можливий граничний ризик для конкретної морської якості судна на основі мінімально допустимого відносного рівня безпеки.

Висновки. Таким чином, у статті розглянуто методику нечіткого кількісного оцінювання ризиків, які можуть виникнути під час управління суд-

ном за курсом рульового. Оцінювання безпеки мореплавства розглядається у різних аспектах. У роботі визначено функцію приналежності нечіткої множини станів, яка пов'язана з ризиком судна під управлінням рульового. Ця функція дає змогу визначити рівень оцінки безпеки за критерієм якості управління. Тобто для визначення ризику утримання судна на курсі, що контролюється рульовим управлінням, необхідно скористатися розрахунком функції ризику з оцінкою випадкового параметра ризику судна на курсі з урахуванням нечіткої мети управління та створення обчислювального набору альтернатив. При цьому, для оцінки поточного рівня безпеки та контролю значення ризику необхідно використовувати отриманий розподіл емпіричних даних та функцію приналежності.

Список літератури:

1. Johansen Th., Utne I.B. Supervisory risk control of autonomous surface ships. *Ocean Engineering*. 2022. Vol. 251. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0029801822004620> (дата звернення: 02.04.24).
2. Mohović Đ., Mohović R., Rudan I. Simulation of Ship Movement after Steering System Failure to Determine the Worst Case Scenario of Grounding. *ROMET – Traffic & Transportation*. Vol. 25. 2013. URL: https://www.researchgate.net/publication/272807539_Simulation_of_Ship_Movement_after_Steering_System_Failure_to_Determine_the_Worst_Case_Scenario_of_Grounding (дата звернення: 02.04.24).
3. Risk-Based Mode Control System for the Hybrid-Electric Machinery System of an Autonomous Ship System Failure to Determine the Worst Case Scenario of Grounding. 2023. URL: https://www.researchgate.net/publication/367339860_Risk-Based_Mode_Control_System_for_the_Hybrid-Electric_Machinery_System_of_an_Autonomous_Ship (дата звернення: 02.04.24).
4. Thieme Ch., Mosleh A., Utne I., Hegde J. Incorporating software failure in risk analysis – Part 2: Risk modelling process and case study. *Reliability Engineering & System Safety*. URL: https://www.researchgate.net/publication/341795753_Incorporating_software_failure_in_risk_analysis--Part_2_Risk_modeling_process_and_case_study (дата звернення: 02.04.24).
5. Gucma S., Przywarty M., Slaczka W., Gralak R. Risk of Grounding by a Ship Passing a Fairway -Simulation Method of Navigational Risk Estimation in Emergency Situations. *European Navigation Conference*. 2019. P. 1–6.
6. Fuji Y., Yamanouchi H., Mizuki N. On the Fundamentals of Marine Traffic Control. Part 1 Probabilities of Collision and Evasive Actions. *Electronic Navigation Research Institute Papers*. 1970. Vol. 2. P. 1–16.
7. Zadeh L.A. Fuzzy Sets. *Information and Control*. 1965. Vol. 8. P. 338–353. DOI: 10.2307/2272014.
8. Porathe T. Human-machine interaction between unmanned, autonomous, ships and manned non-SOLAS vessels in confined and inshore waters: research needs. In Proceedings of international conference on advanced intelligent maritime safety and technology, Riviera Hotel, Daejeon, Republic of Korea, 12–14 November 2015. 5 p.
9. Stanton N.A. et al. Distributed situation awareness in dynamic systems: theoretical development and application of an ergonomics methodology. *Ergonomics*. 2006. Vol. 49 (12–13). P. 1288–1311.
10. Nærings- og fiskeridepartementet. Forskrift om fartøy under 24 m som fører 12 eller færre passasjerer. Regulations for vessels under 24 m carrying 12 or fewer passengers. FOR-2020-01-14-63, Nærings-og fiskeridepartementet, Oslo. 2020. URL: <https://lovdata.no/dokument/LTI/forskrift/2020-01-14-63> (дата звернення: 02.04.2024).
11. Bond J., Hindley R., Kendrick A., Kamarainen J., Kuulila L. Evaluating risk and determining operational limitations for ship in ice. *Arctic Technology Conference*, Houston, Texas, USA, November 5–7, 2018. DOI: <https://doi.org/10.4043/29143-MS>.
12. Goerlandt F., Montewka J. Maritime transportation risk analysis: review and analysis in light of some foundational issues. *Reliability Engineering & System Safety*. 2015. Vol. 138. P. 115–134.

Voichenko T.O., Shevchenko A.P., Shtrybets V.V., Trofymenko A.O. THE METHODOLOGY FOR FUZZY RISK ASSESSMENT AND STEERING CONTROL OF SHIP MOTION

The aim of the article is to develop a methodology for fuzzy risk assessment and steering control of ship motion based on the membership function of a fuzzy set of states associated with ship yaw. This goal is achieved by assessing the safety of navigation in various aspects, in particular, in assessing the quality of ship control relative to a given course. It is determined that the membership function for the steering control process can be established by applying logical solutions or statistical estimates based on the analysis of course diagrams obtained as a result of ship control by helmsmen with different degrees of training and individual qualities. Representations of the membership function in the form of a linear distribution are proposed; the error value of keeping the ship on the course of the helmsman is defined as the total error of these two standard errors; the use of a two-parameter element of alternatives of a fuzzy set, defined by a linguistic term, in assessing the quality of steering is proposed; it is determined that the goal of controlling the quality of the ship's course is fuzzy and can be represented as a fuzzy set of alternatives with a membership function determined by the risk utility for the relative value of the risk. The overall assessment of the error of keeping the vessel on the helmsman's course is defined as the sum of two independent standard errors: the error of the directional indicator (compass) used by the helmsman and the personal quality of the helmsman in controlling the vessel. The most significant result is the determination of the membership function of the fuzzy set of states associated with the yaw of the vessel under the helmsman's control. Using this function, it is possible to determine the level of safety assessment according to the control quality criterion. To determine the risk of keeping the vessel on a course controlled by steering, it is necessary to calculate a risk function with an estimate of the random parameter of the vessel's risk on the course, taking into account the fuzzy control objective and the creation of a computational set of alternatives. The helmsman can accept the risk only if the probable level of safety does not exceed the threshold of unacceptable value.

Key words: risk assessment, helmsman, quality of control, ship heeling, fuzzy set, membership function.