

УДК 621.316.313:629.5.067

DOI 10.47049/2226-1915-2025-3-206-222

**МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ВИБОРУ
ОПТИМАЛЬНОГО СЦЕНАРІЮ ВИКОНАННЯ СУДНОВИХ ОПЕРАЦІЙ
НА ОСНОВІ РИЗИК-ОРІЄНТОВАНОЇ МЕРЕЖІ КРИТЕРІЇВ**

О.І. Сагайдак

старший викладач кафедри навігації і керування судном

ORCID ID 0000-0002-8294-8828

О.М. Мельник

д.т.н., професор кафедри судноводіння і морської безпеки

ORCID ID 0000-0001-9228-8459

А.О. Волошин

к.т.н., професор кафедри судноводіння і морської безпеки

ORCID ID 0000-0003-3993-5826

В.Б. Терновський

д.ф-м.н., професор кафедри судноводіння і морської безпеки

ORCID ID 0000-0002-4402-4157

Одеський національний морський університет, Одеса, Україна

Анотація. У статті розроблено формалізовану модель вибору оптимального сценарію виконання суднових операцій із врахуванням ризик-орієнтованої структури критеріїв. Методика передбачає побудову мережевої залежності між критеріями ефективності та факторами ризику, що мають вплив на безпеку судноплавства.

Розглянуто можливість агрегування інтегрального ризику за допомогою матриці ваг та функції скоригованої корисності з параметром ризик-аверсії. Модель апробовано на прикладі навігаційного переходу з альтернативами маршруту, з урахуванням змін погодних умов та рівня операційної надійності.

Проведено сценарний аналіз із застосуванням методів чутливості, що дозволило виявити вплив ключових чинників на прийняття рішення.

Запропонований підхід може бути інтегровано в систему підтримки прийняття рішень (DSS) підприємств галузі з метою підвищення рівня обґрунтованості та адаптивності управлінських рішень в умовах невизначеності та ризику.

Зокрема, такий метод дозволяє оцінювати потенційні сценарії подальших дій на основі накопиченого досвіду, та автоматично формувати стратегічні пріоритети з урахуванням змін у зовнішньому середовищі.

© Сагайдак О.І., Мельник О.М., Волошин А.О., Терновський В.Б., 2025

Окрім того, оперативно адаптувати операційні процеси, що особливо актуально для судноплавних компаній, які працюють в умовах обмежених ресурсів, регуляторного тиску, та зростаючих вимог до безпеки та сталості підприємств.

Ключові слова: суднові операції, багатокритеріальний аналіз, ризик-орієнтоване управління, мережеві моделі, інтегральний ризик, морський транспорт, стратегія вибору, система підтримки прийняття рішень, судноплавство, навігаційні сценарії, управління ризиками, морське середовище, критерії ризику, морські перевезення, оптимізація маршрутів, операційна безпека суден, навігаційні ризики, погодні умови, логістичні операції.

UDC 621.316.313:629.5.067

DOI 10.47049/2226-1915-2025-3-206-222

**MATHEMATICAL MODEL OF OPTIMAL SCENARIO
SELECTION OF SHIP OPERATIONS BASED
ON A RISK-ORIENTED NETWORK CRITERION**

O. Sagaydak

Senior Lecturer of the Navigation and Ship Handling Department
ORCID ID 0000-0002-8294-8828

O. Melnyk

Doctor of Technical Sciences,
Professor of the Navigation and Maritime Safety Department
ORCID ID 0000-0001-9228-8459

A. Voloshyn

Candidate of Technical Sciences,
Professor of the Navigation and Maritime Safety Department
ORCID ID: 0000-0003-3993-5826

V. Ternovsky

Doctor of Physical and Mathematical Sciences,
Professor of the Navigation and Maritime Safety Department
ORCID ID: 0000-0002-4402-4157

Одеський національний морський університет, Одеса, Україна

Abstract. The article develops a formalized model for choosing the optimal scenario for performing ship operations, taking into account the risk-oriented structure of the criteria. The methodology involves constructing a network relationship between performance criteria and risk factors that impact shipping safety. The possibility of aggregation of integral risk using the weight matrix and the function of adjusted utility with the risk-aversion parameter is considered. The model was tested on the example of a navigation transition with route alternatives, taking into account changes in weather conditions and the level of operational reliability. A scenario analysis was carried out using sensitivity methods, which made it possible to identify the influence of key factors

on decision-making. The proposed approach can be integrated into the decision support system (DSS) of industry enterprises to increase the level of validity and adaptability of management decisions in conditions of uncertainty and risk. In particular, this method allows you to evaluate potential scenarios of further actions based on accumulated experience, and automatically form strategic priorities taking into account changes in the external environment. In addition, to quickly adapt operational processes, which is especially relevant for shipping companies operating in conditions of limited resources, regulatory pressure, and growing requirements for the safety and sustainability of enterprises.

Keywords: *ship operations, multi-criteria analysis, risk-oriented management, network models, integral risk, sea transport, selection strategy, decision support system, shipping, navigation scenarios, risk management, marine environment, risk criteria, sea transportation, route optimization, operational safety of ships, navigation risks, weather conditions, logistics operations.*

Вступ. Сучасне міжнародне судноплавство функціонує в умовах підвищеної складності як логістичних і технічних так і операційних процесів, що зумовлює потребу в якісному управлінні ризиками. Впровадження нових технологій, збільшення частки автономних суден, а також зростання інтенсивності морських перевезень і разом з тим посилення вимог щодо безпеки та екологічної стійкості галузі, створює багатокомпонентне середовище з численними взаємозалежними ризиками. У зв'язку з цим надзвичайно важливою є розробка структурованого підходу до ідентифікації, класифікації та оцінювання ризиків у судноплавних підприємствах.

Огляд наукової літератури по темі дослідження свідчить про зростання інтересу до системного підходу в управлінні ризиками на морському транспорті. Дослідження авторів у [1; 3; 12; 13] демонструють, що ефективне управління потребує врахування не лише технічних, а й екологічних, організаційних та людських чинників. Значна увага також приділяється моделюванню ризиків зіткнення суден, де сучасні публікації [4; 5; 18; 19] акцентують її на побудові моделей уникнення, прогнозуванні траєкторій і використанні алгоритмів глибокого навчання.

Паралельно з цим розвиваються інтегровані методики підтримки рішень у ризик-менеджменті. Роботи [6; 8; 10; 11] пропонують гібридні моделі (АНР, fuzzy TOPSIS, DEMATEL, Type-2 Fuzzy Bayesian), які дозволяють обробляти невизначеність у складних ситуаціях. Особливої актуальності набуває тематика людського фактору в умовах зростання автономізації суден [7; 15; 17]. Системні огляди [9; 14; 16] узагальнюють наявні концептуальні моделі та пропонують нові підходи на основі ентропії й штучного інтелекту. Праці вітчизняних вчених [2; 20-23] також мають прикладне спрямування й охоплюють питання судової безпеки, кіберстійкості флоту та екологічної адаптації до ІМО 2050.

Постановка проблеми. Незважаючи на зростаючу кількість досліджень у галузі управління морськими ризиками, залишається низка невирішених питань. Зокрема, відсутній уніфікований підхід до структуризації ризиків, який би одночасно враховував специфіку процесу експлуатації суден, динамічні сценарії взаємодії ризиків та баланс між суб'єктивними оцінками та кількісними методами такої оцінки.

Окрім того, існуючі методики часто орієнтовані на локальні аспекти (наприклад, попередження зіткнення чи забезпечення процесу навігації), що обмежує можливості їх інтеграції в єдину корпоративну систему управління ризиками судноплавного підприємства.

Мета дослідження. Таким чином метою даної роботи є розроблення формалізованої багаторівневої моделі вибору оптимального сценарію суднових операцій з урахуванням мережевої структури ризиків, багатокритеріальної оцінки ефективності та адаптації до умов невизначеності. Завдання дослідження полягали в побудові багаторівневої мережевої моделі, що об'єднує цілі, критерії ефективності та кластери ризиків, формалізації процесу оцінювання сценаріїв через систему вагових коефіцієнтів, мережевої агрегації ризиків і функції скоригованої корисності і застосуванні багатокритеріального алгоритму практичного вибору оптимального сценарію виконання суднових операцій.

Результати дослідження. Вибір оптимального сценарію суднових операцій у складних та динамічних умовах морського середовища потребує інтегрованого підходу, що поєднує класичну оцінку ефективності виконання операцій з аналізом потенційних ризиків. Традиційні критерії – такі як навігаційна безпека, економічна доцільність, технічна надійність, екологічність тощо – залишаються ключовими для обґрунтованого вибору. Проте в умовах зростаючої складності судноплавних систем та невизначеності зовнішніх впливів усе більшої актуальності набуває врахування багатовимірної структури ризиків, які суттєво впливають на кінцеві результати експлуатаційної діяльності.

У цьому контексті доцільним є застосування багаторівневої ризик-орієнтованої моделі, яка дозволяє поєднати кількісну оцінку ефективності з формалізованим урахуванням мережі ризик-факторів і така модель повинна передбачати як агрегацію критеріїв з урахуванням як їхньої важливості, так і взаємозалежних впливів ризиків на кожен із них, а також мережеву оцінку сукупного ризику для кожного сценарію. У результаті, вибір оптимальної альтернативи ґрунтується на скоригованій функції корисності, що дає змогу досягти балансу між бажаними вигодами та прийнятним рівнем ризику.

На рисунку 1 подано багаторівневу структуру моделі ризиків у суднових операціях. Верхній рівень визначає основну мету та критерії оптимізації, середній рівень представлений мережею взаємопов'язаних кластерів і факторів ризику, а нижній рівень – можливими сценаріями й операційними альтернативами. Взаємозв'язки між кластерами, демонструють системний характер ризиків і необхідність їх комплексного врахування у математичній моделі.

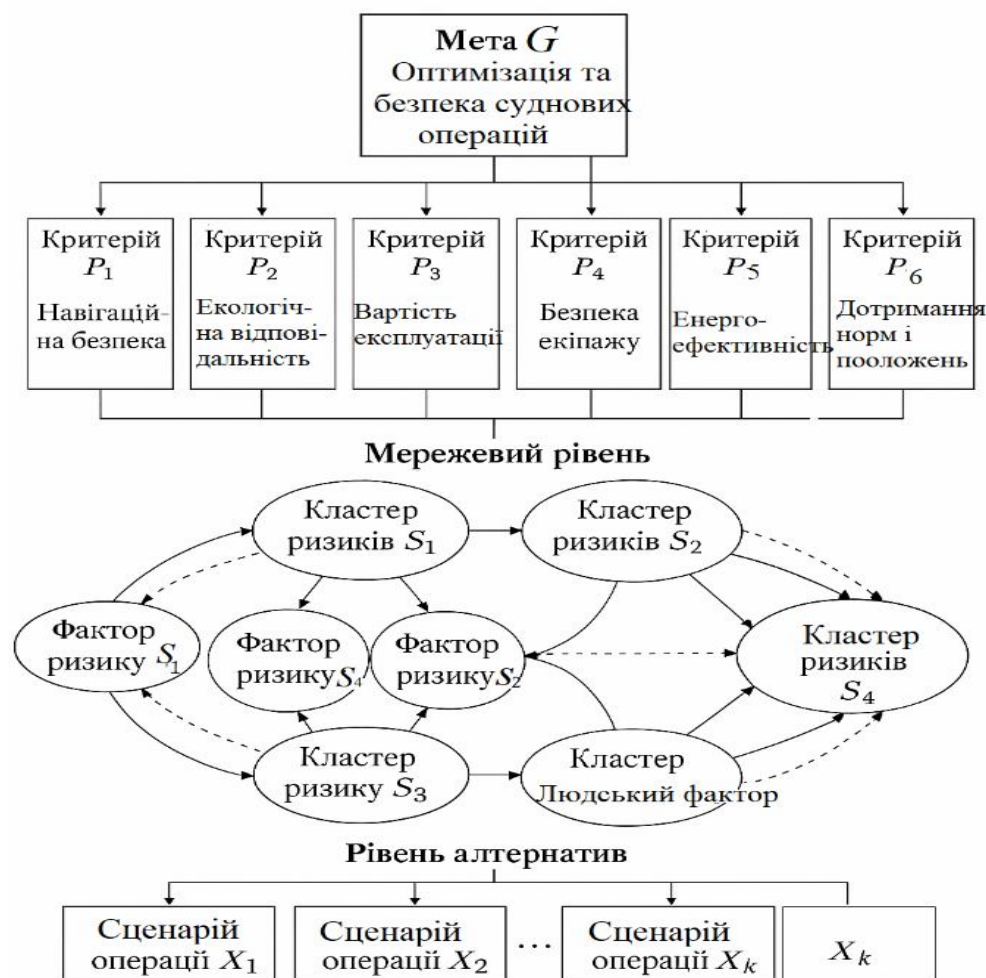


Рис. 1. Багаторівнева мережна модель
ризик-орієнтованого вибору сценарію суднових операцій

На верхньому («контрольному») рівні розміщено стратегічну мету G – оптимізацію та безпеку суднових операцій, яка формалізується через систему критеріїв (P_1 ; P_2 - P_6): навігаційна безпека, екологічна відповідальність, вартість експлуатації, безпека екіпажу, енергоефективність, дотримання норм і положень.

Середній («мережевий») рівень представлено кластерами ризиків (S_1 ; S_2 ; S_3 ; S_4), кожен із яких складається з низки пов'язаних між собою факторів ризику; між кластерами також існують взаємозалежності, що відображають реальні багатовимірні ризикові впливи на суднові операції.

На нижньому («альтернативному») рівні зображено сукупність можливих сценаріїв операцій ($X_1; X_2 \dots X_k$), які оцінюються за всіма критеріями з урахуванням впливу відповідної мережі ризиків. Представлена структура дозволяє здійснювати комплексну багатокритеріальну оцінку та обґрунтований вибір оптимальної альтернативи, інтегруючи класичний аналіз і мережеві ефекти ризиків.

Класична задача вибору оптимального сценарію експлуатації судна в складних умовах в загальному вигляді формулюється як максимізація сукупної корисності серед набору альтернатив.

Нехай $X = \{X_1; X_2 \dots X_k\}$ позначимо множину можливих сценаріїв, кожен з яких оцінюється на основі сукупної корисності $U(X_k)$, розрахованої на основі зважених критеріїв ефективності (наприклад, безпека, економічність, вплив на довкілля). Метою класичної моделі є пошук такого сценарію X^* , за якого функція корисності досягає максимального значення

$$X^* = \arg \max_{X_k \in \mathcal{X}} U(X_k), \quad (1)$$

або еквівалентно,

$$G = \max_{X_k \in \mathcal{X}} [U(X_k)] \quad (2)$$

де $U^*(X_k)$ – скоригована функція корисності (з урахуванням ризику).

Таким чином, відбір виконується виключно за критеріями ефективності, без явного врахування ризиків, які можуть істотно вплинути на результат. Як наслідок, така модель визначає «ідеальну» альтернативу, але не відображає вплив факторів ризику, пов'язаних із реальними морськими операціями.

Щоб усунути це обмеження, наступна розробка запроваджує моделювання мережі ризиків, яке включає комплексну оцінку на основі ризиків для кожного сценарію.

Кожна альтернатива оцінюється за сукупністю критеріїв P_i (наприклад, безпека експлуатації, вартість обладнання, екологічність процесів, тощо), що зважуються за важливістю

$$U(X_k) = \sum_{i=1}^n w_i \cdot Q_i(X_k), \quad (3)$$

де w_i – ваговий коефіцієнт критерію $\left(\sum_{i=1}^n w_i = 1\right)$;

$Q_i(X_k)$ – оцінка альтернативи X_k за критерієм.

Оцінка альтернативи по кожному критерию здійснюється з урахуванням відповідних ризиків

$$Q_i(X_k) = f_i(\{R_j(X_k)\}_{j \in J_i}), \quad (4)$$

де J_i – підмножина ризиків, що впливають на критерій I ;

f_i – функція агрегування (наприклад, середньозважене, максимум або мінімум);

$R_j(X_k)$ – інтегральна оцінка ризику j для сценарію X_k .

Вплив кожного ризик-фактора визначається не лише власною оцінкою, але й залежностями з іншими ризиками (наприклад, технічна несправність може посилювати навігаційний чи екологічний ризик)

$$R_j(X_k) = \varphi_j(r_j(X_k), \{r_l(X_k)\}_{l \in N_j}), \quad (5)$$

де $r_j(X_k)$ – базова ймовірність чи інтенсивність ризику j для сценарію X_k ;

N_j – множина ризиків, що впливають на j ;

φ_j – функція мережевої агрегації (наприклад, лінійна, адитивна або байєсівська).

Для кожного сценарію визначається сукупний (інтегральний) ризик, що є агрегованою оцінкою всіх значущих ризиків

$$\mathcal{R}(X_k) = \sum_{j=1}^m v_j \cdot R_j(X_k), \quad (6)$$

де v_j – ваговий коефіцієнт ризику ($\sum v_j = 1$);

$(R_j(X_k))$ – оцінка j -го ризику для сценарію X_k ;

m – кількість врахованих ризиків.

З метою відображення ризик-аверсії, підсумкова функція корисності для кожного сценарію коригується з урахуванням інтегрального ризику

$$U^*(X_k) = U(X_k) - \lambda \cdot \mathcal{R}(X_k), \quad (7)$$

де λ – коефіцієнт ризик-аверсії (чим більший, тим сильніше враховується ризик).

Остаточний вибір сценарію здійснюється на основі максимального значення скоригованої функції корисності, що дозволяє обрати оптимальний варіант з множини допустимих альтернатив. Рішення приймається за критерієм максимуму значення функції $U^*(X_k)$, де $X_k \in X$, згідно з (1).

Запропонована математична модель забезпечує комплексний, формалізований підхід до вибору оптимального сценарію суднових операцій із урахуванням багатокритеріальних вимог та мережевої структури ризиків і дозволяє:

- системно агрегувати різноманітні критерії ефективності (безпека, економіка, екологічність, тощо) з урахуванням їхньої ваги для прийняття рішень у конкретному контексті;

- враховувати складну взаємодію між численними ризик-факторами завдяки мережевій структурі залежностей, що наближає оцінювання до реальних умов;

- гнучко адаптувати рівень ризик-аверсії залежно від операційної політики судноплавних компанії або зовнішніх вимог;

- забезпечити прозорість і обґрунтованість вибору, що є особливо важливим для обґрунтування рішень у сферах із підвищеною відповідальністю та для зовнішнього аудиту.

Таким чином, отримана формальна структура дозволяє здійснювати прозору, науково обґрунтовану та адаптивну оцінку альтернатив у судових операціях із урахуванням реальних ризиків, сприяючи підвищенню як ефективності, так і безпеки функціонування морського транспорту.

Формалізована багаторівнева математична модель поєднує класичну багатокритеріальну оцінку з ризик-орієнтованим підходом. Її особливістю є:

- урахування не лише критеріїв ефективності, а й взаємозалежних ризик-факторів;

- моделювання мережових впливів між ризиками та критеріями;

- можливість варіативного налаштування коефіцієнта ризик-аверсії (λ), що забезпечує адаптивність моделі;

- використання скоригованої функції корисності як єдиного інтегрального показника для прийняття рішень.

Запропонована модель дозволяє кількісно оцінити вплив ризиків на очікувану ефективність сценаріїв та обґрунтовано обрати оптимальний варіант з огляду на стратегічні цілі, доступні ресурси та допустимий рівень невизначеності.

Створення алгоритму прийняття рішення з урахуванням багатокритеріальної оцінки та мережових ризиків

Для забезпечення обґрунтованого прийняття рішень у складних системах, таких, як судові операції, де існує декілька альтернатив та значна невизначеність, доцільно використовувати системний підхід, що поєднує багатокритеріальну оцінку з урахуванням ризиків.

Наведений на рисунку 2 алгоритм дозволяє структуровано провести аналіз можливих сценаріїв, враховуючи вплив різних ризик-факторів на ключові критерії ефективності та безпеки експлуатації судна. Такий підхід також може застосовуватися для об'єктивної оптимізації вибору сценарію у сферах транспорту, логістики, інженерії, енергетики тощо.

Представлений алгоритм поетапно структурує процес вибору оптимального рішення у складних, таких як судові операції, системах із багатьма сценаріями та ризиками. На першому етапі формується повний перелік можливих альтернатив – наприклад, варіанти маршрутів переходу судна чи рутинних операцій на борту, – після чого визначаються релевантні критерії оцінювання та їхня вагомість згідно з поставленими цілями.

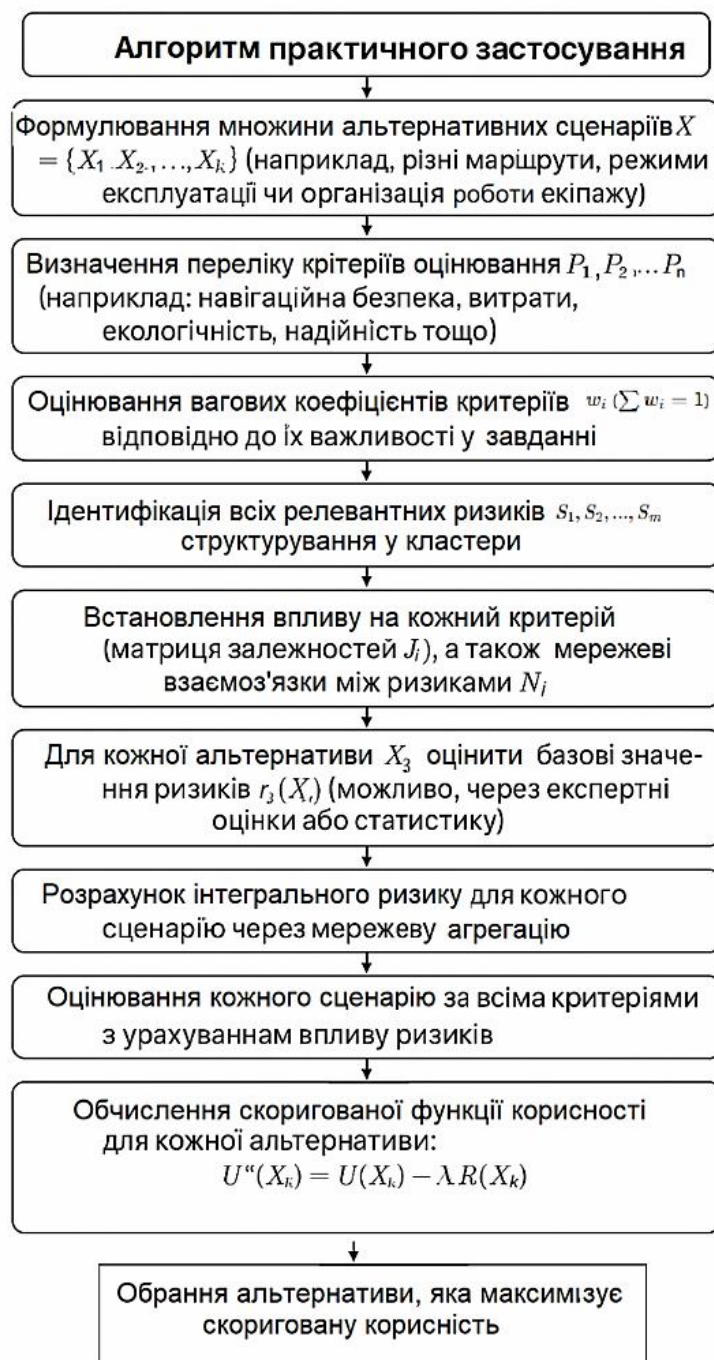


Рис. 2. Алгоритм практичного вибору оптимального сценарію в умовах багатокритеріальності та ризиків

Далі ідентифікуються всі потенційні ризики, які групуються за функціональними чи логічними ознаками, і будуються залежності між ризиками та критеріями, а також мережеві взаємозв'язки між самими ризиками. Інтегральний ризик для кожного сценарію розраховується шляхом агрегації базових ризиків з урахуванням мережевої структури залежностей, що дозволяє врахувати не лише прямий вплив окремих ризиків, а й їхній опосередкований вплив через взаємозв'язки. Виконується багатокритеріальна оцінка кожної альтернативи, при якій для кожного сценарію враховується не лише значення по окремих критеріях, а й коригування на інтегральний ризик.

Кожна альтернатива оцінюється з урахуванням як базових значень ризиків (на основі статистики чи експертних даних), так і їхньої інтеграції через мережеву агрегацію, що дозволяє врахувати як прямий, так і опосередкований вплив ризиків, що дає можливість на підставі багатокритеріальної оцінки розрахувати інтегральну корисність сценарію з коригуванням на ризик, що забезпечує врахування не лише очікуваної вигоди, а й потенційних втрат від ризикових подій. Завершальним етапом є вибір такої альтернативи, яка максимізує скориговану корисність, тобто забезпечує найкращий баланс між ефективністю виконання операції та прийнятним рівнем ризику, що дозволяє приймати стратегічно обґрунтовані рішення навіть у ситуаціях з високою невизначеністю та множиною конкуруючих чинників.

Розглянуто два альтернативні сценарії навігаційного переходу судна: стандартний маршрут (X_1) та альтернативний маршрут з обходом зони штормових умов (X_2). Оцінювання здійснюється за трьома ключовими критеріями: навігаційна безпека, експлуатаційні витрати, екологічність (енергоефективність), де кожен критерій має свою вагу, що відображає його значущість для прийняття рішення. Для кожного сценарію визначаються рівні трьох основних ризиків (навігаційного, екологічного, технічного), які впливають на оцінку альтернативи. Після агрегації значень критеріїв та ризиків обчислюється скоригована функція корисності – інтегральний показник, що враховує як вигоди сценарію, так і пов'язані з ним ризики.

Результати розрахунків показали, що альтернативний маршрут (X_2) забезпечує не лише вищу «ідеальну» корисність (без урахування ризиків), а й більшу скориговану корисність з урахуванням ризик-аверсії ($U^*(X_2) = 0,66$), порівняно із стандартним $U^*(X_1) = 0,52$). Отже, у заданих умовах, модель рекомендує обирати саме альтернативний маршрут як оптимальний з погляду поєднання ефективності та ризиків.

У процесі аналізу ефективності альтернативних сценаріїв суднових операцій (навігаційний перехід) проведено порівняння за трьома ключовими критеріями: навігаційна безпека (P_1), експлуатаційні витрати (P_2) та екологічна відповідність (P_3). Для кожного сценарію – стандартного (X_1) та альтернативного (X_2) – були отримані відповідні оцінки за шкалою від 0 до 1. Результати подано на рисунку 3.

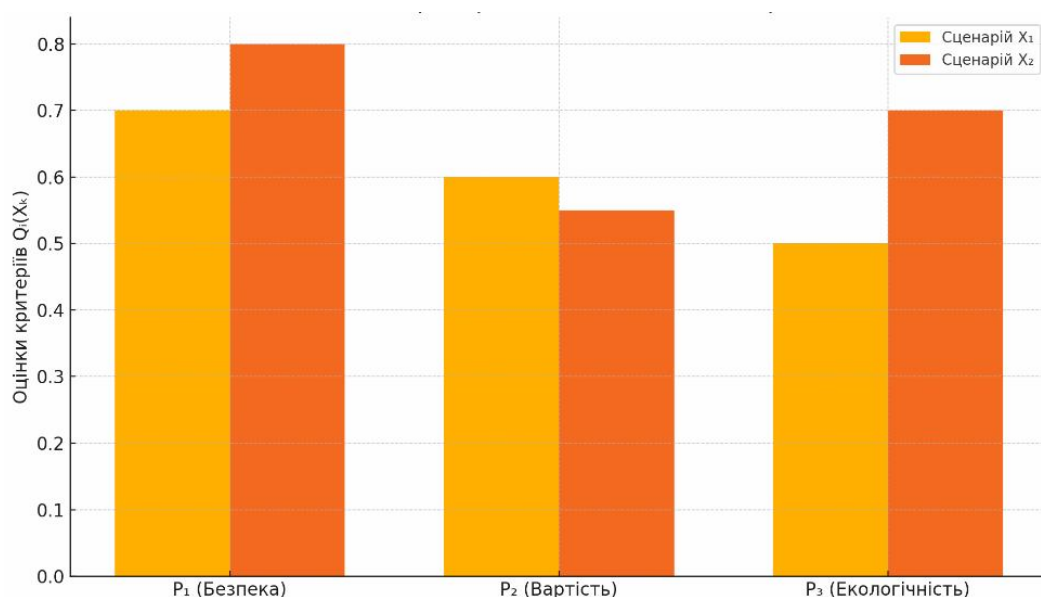


Рис. 3. Оцінки критеріїв для кожного сценарію

Як видно з діаграми, альтернативний сценарій (X_2) демонструє вищу оцінку з точки зору навігаційної безпеки (0,8 проти 0,7) та екологічності (0,7 проти 0,5), що вказує на його більшу стратегічну перевагу у критичних аспектах. Натомість стандартний сценарій (X_1) показує трохи кращий результат у параметрі вартості (0,6 проти 0,55). Загалом, сценарій X_2 має більш збалансований профіль з огляду на сучасні вимоги до безпеки та тенденції сталого розвитку.

Наступний етап оцінки полягає у врахуванні ризику, що супроводжує кожен зі сценаріїв. Для цього використано скориговану функцію корисності U^* , де $U^*(X_1)$ – базова корисність, $R(X_1)$ – інтегральний ризик, а λ – коефіцієнт ризик-аверсії, що відображає відношення приймача рішень до ризику (від 0 – повна байдужість, до 1 – максимальна чутливість до ризику). Залежність скоригованої корисності від λ подано на рисунку 4.

На графіку чітко продемонстровано, що при всіх значеннях λ сценарій X_2 зберігає перевагу над X_1 , хоча її масштаб зменшується зі зростанням рівня ризик-аверсії. Зокрема, при $\lambda = 0$ (ризик ігнорується) різниця між сценаріями максимальна, але навіть при $\lambda = 1$ (максимальне урахування ризику) скоригована корисність альтернативного сценарію залишається вищою, що свідчить про його стійкість до різних підходів до управління ризиком і робить його пріоритетним з позиції системного аналізу.

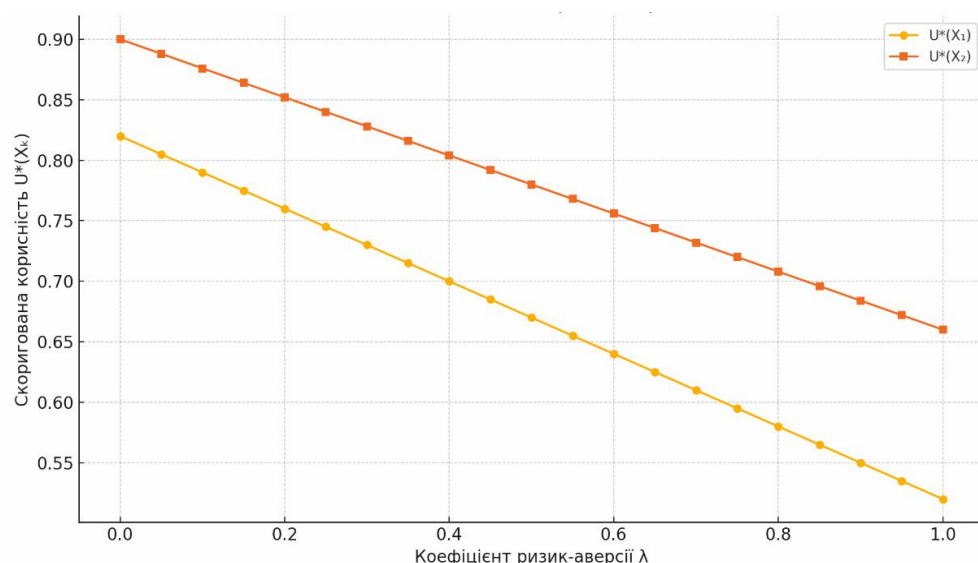


Рис. 4. Вплив коефіцієнта ризик-аверсії λ на скориговану корисність сценаріїв

Запропоновану модель було реалізовано у вигляді покрокового алгоритму, придатного для практичного застосування, який забезпечує:

- формування множини альтернатив з урахуванням операційних сценаріїв;
- систематизацію ризиків та їх кластеризацію відповідно до джерел виникнення;
- побудову залежностей між ризиками та критеріями, а також внутрішніх мережових взаємозв'язків;
- обчислення інтегрального ризику та скоригованої корисності для кожної альтернативи;
- вибір оптимального сценарію на основі максимізації скоригованої функції корисності.

Результати прикладного застосування алгоритму демонструють, що навіть за однакової кількості переваг у класичному розумінні, врахування структури ризиків дозволяє виявити сценарії з покращеною реальною ефективністю в умовах невизначеності.

Висновки. У статті обґрунтовано необхідність врахування складної структури ризиків при виборі сценаріїв виконання суднових операцій. Запропонована багаторівнева модель дозволяє поєднувати класичний підхід до багатокритеріальної оцінки з мережевою структурою ризиків і враховувати не лише прямі, але й опосередковані впливи ризиків через взаємозалежності.

Крім того адаптувати рівень ризик-аверсії залежно від операційної політики підприємства та досягати обґрунтованого балансу між ефективністю та безпекою у морському середовищі. Прикладний експеримент показав перевагу альтернативного маршруту переходу при повному урахуванні ризиків, що підтверджує доцільність інтеграції такої моделі у практику управління операціями судна.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Fu S., Gu S., Zhang Y., Zhang M., & Weng J. (2023). Towards system-theoretic risk management for maritime transportation systems: A case study of the yangtze river estuary. *Ocean Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.115637>.
2. Мельник О. (2023). Аналіз та оцінка рівня безпеки судна на прикладі багатопарової моделі. *Вісник Одеського національного морського університету*, (70), Р. 34-46. <https://doi.org/10.47049/2226-1893-2023-3-34-46>.
3. Wang N., Yuen K.F., Yuan J., & Li D. (2024). Ship collision risk assessment: A multi-criteria decision-making framework based on Dempster-Shafer evidence theory. *Applied Soft Computing*, 162, 111823. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2024.111823/>
4. Pan W., Wang Y., Xie X., Li M., & Fan J. (2024). Ship Collision Risk Assessment Algorithm Based on the Especial Cautious Navigation Angle Model. *Journal of Marine Science and Engineering*, 13(1), 173. <https://doi.org/10.3390/jmse13010173>.
5. Huang J., & Ung S. (2023). Risk Assessment and Traffic Behaviour Evaluation of Ships. *Journal of Marine Science and Engineering*, 11 (12), 2297. <https://doi.org/10.3390/jmse11122297>.
6. Chen C., Zhang X., Wang G., Feng F., Sun C., & He Q. (2023). A hybrid multi-criteria decision-making framework for ship-equipment suitability evaluation using improved ISM, AHP, and fuzzy TOPSIS methods. *Journal of Marine Science and Engineering*, 11 (3), 607. <https://doi.org/10.3390/jmse11030607>.
7. Li X., Oh P., Zhou Y., & Yuen K. F. (2023). Operational risk identification of maritime surface autonomous ship: A network analysis approach. *Transport Policy*, 130, 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2022.10.012>.
8. Sur J.-M., & Kim Y.-J. (2024). Multi-criteria model for identifying and ranking risky types of maritime accidents using integrated ordinal priority approach and grey relational analysis approach. *Sustainability*, 16 (14), 6023. <https://doi.org/10.3390/su16146023>.
9. Xu M., Ma X., Zhao Y., & Qiao W. (2023). A systematic literature review of maritime transportation safety management. *Journal of Marine Science and Engineering*, 11 (12), 2311. <https://doi.org/10.3390/jmse11122311>.

10. Li X., Zhang X., & Yuan Y. (2024). Dynamic multi-attribute decision-making method for risk-based ship design. *Applied Sciences*, 14 (13), 5387. <https://doi.org/10.3390/app14135387>.
11. Ahmed S., Li T., Huang S., & Cao J. (2023). Dynamic and quantitative risk assessment of cruise ship pod propulsion system failure: An integrated Type-2 fuzzy-Bayesian approach. *Ocean Engineering*, 279, 114601. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.114601>.
12. Basnet S., Bahoo Toroody A., Montewka J., Chaal M., & Valdez Banda O. A. (2023). Selecting cost-effective risk control option for advanced maritime operations: Integration of STPA-BN-influence diagram. *Ocean Engineering*, 280, 114631. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.114631>.
13. Xiao F., Ma Y., & Wu B. (2021). Review of Probabilistic Risk Assessment Models for Ship Collisions with Structures. *Applied Sciences*, 12(7), 3441. <https://doi.org/10.3390/app12073441>.
14. Zhang W., & Zhang Y. (2023). Navigation risk assessment of autonomous ships based on entropy-TOPSIS-coupling coordination model. *Journal of Marine Science and Engineering*, 11 (2), 422. <https://doi.org/10.3390/jmse11020422>.
15. Kim Y., Kim J., Lee W., Park H., & Cho D. J. (2025). FURIOUS: Fully unified risk-assessment with interactive operational user system for vessels. *PLOS ONE*, 20(5), e0323300. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0323300>.
16. Latinopoulos C., Zavvos E., Kaklis D., Leemen V., & Halatsis A. (2025). Marine voyage optimization and weather routing with deep reinforcement learning. *Journal of Marine Science and Engineering*, 13 (5), 902. <https://doi.org/10.3390/jmse13050902>.
17. Zhou Y., Liu Z., Wang X., Xie H., Tao J., Wang J., & Yang Z. (2024). Human errors analysis for remotely controlled ships during collision avoidance. *Frontiers in Marine Science*, 11, 1473367. <https://doi.org/10.3389/fmars.2024.1473367>.
18. Shi J., Liu Z., Feng Y., Wang X., Zhu H., Yang Z., Wang J., & Wang H. (2024). Evolutionary model and risk analysis of ship collision accidents based on complex networks and DEMATEL. *Ocean Engineering*, 305, 117965. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.117965>.
19. Liu T., Xu X., Lei Z., Zhang X., Sha M., & Wang F. (2023). A multi-task deep learning model integrating ship trajectory and collision risk prediction. *Ocean Engineering*, 287, 115870. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.115870>.
20. Melnyk O., Onyshchenko S., Onishchenko O., Shumylo O., Voloshyn A., Koskina Y., & Volianska Y. (2022). Review of ship information security risks and safety of maritime transportation issues. *TransNav: International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, 16 (4), 717–722. <https://doi.org/10.12716/1001.16.04.13>.

21. Melnyk O., Onishchenko O., Onyshchenko S., Golikov V., Sapiha V., Shcherbina O., & Andrievska V. (2022). Study of environmental efficiency of ship operation in terms of freight transportation effectiveness provision. *TransNav*, 16(4), 723–729. <https://doi.org/10.12716/1001.16.04.14>.
22. Melnyk O., Onyshchenko S., Onishchenko O., Lohinov O., & Ocheretna V. (2023). Integral approach to vulnerability assessment of ship's critical equipment and systems. *Transactions on Maritime Science*, 12 (1), 25–37. <https://doi.org/10.7225/toms.v12.n01.002>.
23. Onyshchenko S., Bychkovsky Y., Melnyk O., Onishchenko O., Jurkovič M., Rubskiy V., & Liashenko K. (2024). A model for assessing shipping safety within project-orientated risk management based on human element. *Scientific Journal of the Silesian University of Technology. Series Transport*, 123, 319–334. <https://doi.org/10.20858/sjsutst.2024.123.16>.

REFERENCES

1. Fu, S., Gu, S., Zhang, Y., Zhang, M., & Weng, J. (2023). Towards system-theoretic risk management for maritime transportation systems: A case study of the Yangtze river estuary. *Ocean Engineering*. Volume 286, Part 2, 115637, <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.115637>
2. Melnyk, O. (2023). Analysis and assessment of ship safety using a multilayer model. *Bulletin of Odessa National Maritime University*, (70), 34–46. <https://doi.org/10.47049/2226-1893-2023-3-34-46>
3. Wang, N., Yuen, K. F., Yuan, J., & Li, D. (2024). Ship collision risk assessment: A multi-criteria decision-making framework based on Dempster-Shafer evidence theory. *Applied Soft Computing*, 162, 111823. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2024.111823>
4. Pan, W., Wang, Y., Xie, X., Li, M., & Fan, J. (2024). Ship Collision Risk Assessment Algorithm Based on the Especial Cautious Navigation Angle Model. *Journal of Marine Science and Engineering*, 13(1), 173. <https://doi.org/10.3390/jmse13010173>
5. Huang, J., & Ung, S. (2023). Risk Assessment and Traffic Behaviour Evaluation of Ships. *Journal of Marine Science and Engineering*, 11 (12), 2297. <https://doi.org/10.3390/jmse11122297>
6. Chen, C., Zhang, X., Wang, G., Feng, F., Sun, C., & He, Q. (2023). A hybrid multi-criteria decision-making framework for ship-equipment suitability evaluation using improved ISM, AHP, and fuzzy TOPSIS methods. *Journal of Marine Science and Engineering*, 11(3), 607. <https://doi.org/10.3390/jmse11030607>
7. Li, X., Oh, P., Zhou, Y., & Yuen, K. F. (2023). Operational risk identification of maritime surface autonomous ship: A network analysis approach. *Transport Policy*, 130, 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2022.10.012>

8. Sur, J.-M., & Kim, Y.-J. (2024). Multi-criteria model for identifying and ranking risky types of maritime accidents using integrated ordinal priority approach and grey relational analysis approach. *Sustainability*, 16(14), 6023. <https://doi.org/10.3390/su16146023>
9. Xu, M., Ma, X., Zhao, Y., & Qiao, W. (2023). A systematic literature review of maritime transportation safety management. *Journal of Marine Science and Engineering*, 11(12), 2311. <https://doi.org/10.3390/jmse11122311>
10. Li, X., Zhang, X., & Yuan, Y. (2024). Dynamic multi-attribute decision-making method for risk-based ship design. *Applied Sciences*, 14(13), 5387. <https://doi.org/10.3390/app14135387>
11. Ahmed, S., Li, T., Huang, S., & Cao, J. (2023). Dynamic and quantitative risk assessment of cruise ship pod propulsion system failure: An integrated Type-2 fuzzy-Bayesian approach. *Ocean Engineering*, 279, 114601. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.114601>
12. Basnet, S., BahooToroody, A., Montewka, J., Chaal, M., & Valdez Banda, O.A. (2023). Selecting cost-effective risk control option for advanced maritime operations: Integration of STPA-BN-influence diagram. *Ocean Engineering*, 280, 114631. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.114631>
13. Xiao, F., Ma, Y., & Wu, B. (2021). Review of Probabilistic Risk Assessment Models for Ship Collisions with Structures. *Applied Sciences*, 12(7), 3441. <https://doi.org/10.3390/app12073441>
14. Zhang, W., & Zhang, Y. (2023). Navigation risk assessment of autonomous ships based on entropy-TOPSIS-coupling coordination model. *Journal of Marine Science and Engineering*, 11(2), 422. <https://doi.org/10.3390/jmse11020422>
15. Kim, Y., Kim, J., Lee, W., Park, H., & Cho, D. J. (2025). FURIOUS: Fully unified risk-assessment with interactive operational user system for vessels. *PLOS ONE*, 20(5), e0323300. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0323300>
16. Latinopoulos, C., Zavvos, E., Kaklis, D., Leemen, V., & Halatsis, A. (2025). Marine voyage optimization and weather routing with deep reinforcement learning. *Journal of Marine Science and Engineering*, 13(5), 902. <https://doi.org/10.3390/jmse13050902>
17. Zhou, Y., Liu, Z., Wang, X., Xie, H., Tao, J., Wang, J., & Yang, Z. (2024). Human errors analysis for remotely controlled ships during collision avoidance. *Frontiers in Marine Science*, 11, 1473367. <https://doi.org/10.3389/fmars.2024.1473367>
18. Shi, J., Liu, Z., Feng, Y., Wang, X., Zhu, H., Yang, Z., Wang, J., & Wang, H. (2024). Evolutionary model and risk analysis of ship collision accidents based on complex networks and DEMATEL. *Ocean Engineering*, 305, 117965. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.117965>
19. Liu, T., Xu, X., Lei, Z., Zhang, X., Sha, M., & Wang, F. (2023). A multi-task deep learning model integrating ship trajectory and collision risk prediction. *Ocean Engineering*, 287, 115870. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.115870>

20. Melnyk, O., Onyshchenko, S., Onishchenko, O., Shumylo, O., Voloshyn, A., Koskina, Y., & Volianska, Y. (2022). Review of ship information security risks and safety of maritime transportation issues. *TransNav: International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, 16(4), 717-722. <https://doi.org/10.12716/1001.16.04.13>
21. Melnyk, O., Onishchenko, O., Onyshchenko, S., Golikov, V., Sapiha, V., Shcherbina, O., & Andrievska, V. (2022). Study of environmental efficiency of ship operation in terms of freight transportation effectiveness provision. *TransNav*, 16(4), 723-729. <https://doi.org/10.12716/1001.16.04.14>
22. Melnyk, O., Onyshchenko, S., Onishchenko, O., Lohinov, O., & Oche-retna, V. (2023). Integral approach to vulnerability assessment of ship's critical equipment and systems. *Transactions on Maritime Science*, 12(1), 25-37. <https://doi.org/10.7225/toms.v12.n01.002>
23. Onyshchenko, S., Bychkovsky, Y., Melnyk, O., Onishchenko, O., Jurkovič, M., Rubskyi, V., & Liashenko, K. (2024). A model for assessing shipping safety within project-orientated risk management based on human element. *Scientific Journal of the Silesian University of Technology. Series Transport*, 123, 319-334. <https://doi.org/10.20858/sjsutst.2024.123.16>

Стаття надійшла до редакції 03.06.2025

Посилання на статтю: Сагайдак О.І., Мельник О.М., Волошин А.О., Терновський В.Б. Математична модель вибору оптимального сценарію виконання суднових операцій на основі ризик-орієнтованої мережі критеріїв // *Вісник Одеського національного морського університету*: Зб. наук. праць, 2025. № 3 (77). С. 206-222. DOI 10.47049/2226-1893-2025-3-206-222.

Article received 03.06.2025

Reference a journal artic: Sagaydak O., Melnyk O., Voloshyn A., Ternovsky V. Mathematical model of optimal scenario selection of ship operations based on a risk-oriented network criterion // *Herald of the Odesa National Maritime University*: Coll. scient. works, 2025. № 3 (77). P. 206-222. DOI 10.47049/2226-1893-2025-3-206-222.