

УДК 629.5.018.7
DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.3.1/48>

Никитюк П.В.

Одеський національний морський університет

Мельник О.М.

Одеський національний морський університет

АДАПТИВНА ОЦІНКА ДЕГРАДАЦІЇ БАР'ЄРІВ БЕЗПЕКИ СУДНА ТА АНАЛІЗ ЕКСПЛУАТАЦІЙНОГО РИЗИКУ

У статті запропоновано підхід до оцінки експлуатаційного ризику морських суден на основі інтегрованої моделі адаптивного аналізу безпеки, яка враховує деградацію бар'єрів, змінність технічного стану підсистем та зовнішні фактори. Методологія базується на багаторівневій ймовірнісній схемі, що дозволяє моделювати часову динаміку ризику за допомогою узагальнених індикаторів: інтегрованого індексу ризику, запасу безпеки та прогнозованого часу до досягнення критичного стану. Розроблено нову систему формул з урахуванням експоненційної деградації бар'єрів безпеки, вагової значущості підсистем та динамічного оновлення ймовірностей відмов. Проведено симуляційне моделювання на прикладі трьох типів суден (балкер, контейнеровоз, танкер) у шести сценаріях експлуатації, зокрема критичних режимах, що дозволило продемонструвати адаптивність та прогностичну здатність моделі. Окрім технічної реалізації, особливу увагу в роботі приділено логіці сценарного аналізу, що охоплює як нормальні умови, так і стресові експлуатаційні режими. Використання адаптивного підходу дозволяє гнучко змінювати вагові коефіцієнти підсистем залежно від типу судна та його навантаження. Результати числового моделювання показали високу інформативність індексу як універсального індикатора наближення до критичного стану, що може бути використаний як ключовий параметр у системах підтримки прийняття рішень для морської галузі. Інтерпретація результатів включає часову еволюцію індексу ризику, момент перевищення критичних меж, динаміку запасу безпеки та прогноз часу реагування. Запропонована система може бути впроваджена в функціональні платформи управління безпекою морських суден, зокрема в режимі автономного плавання, а також як інструмент превентивної діагностики технічного стану в умовах багатофакторної невизначеності. Практична цінність моделі полягає у її здатності формувати рекомендації щодо адаптації маршруту, швидкості чи режиму експлуатації з метою мінімізації аварійних ситуацій.

Ключові слова: морський транспорт, експлуатаційна безпека, багатофакторний аналіз, система підтримки прийняття рішень, оцінка ризику, бар'єри безпеки, процес навігації, технічний стан, деградація, критичний стан, прогнозування, адаптивне управління, автоматизація процесів, судноплавство, надійність системи, багатосценарне моделювання.

Постановка проблеми. У сучасних умовах експлуатації морських суден значно зростає складність процесу контролю та управління експлуатаційною безпекою суден через вплив динамічного середовища, технічну зношеність систем та кіберфізичні загрози. Зокрема, з розвитком автономного та автоматизованого судноплавства, вектор морської безпеки зміщується у бік інтегрованих технологічних рішень, що мають забезпечувати своєчасне виявлення загроз і адаптивне реагування. Класичні підходи до оцінки технічного стану підсистем часто не враховують часову деградацію бар'єрів безпеки, мультифакторність ризиків та необхідність прогнозу ймовірності настання критичного стану.

Водночас, експлуатаційна надійність морського транспорту все частіше базується на моделюванні взаємозалежностей між технічними системами, зовнішніми факторами середовища і функціонуванням захисних бар'єрів. У реальних умовах судноплавства, навіть незначні затримки у виявленні загроз можуть призвести до аварійних ситуацій із високими економічними, екологічними або людськими втратами. Таким чином, розроблення моделей, що дозволяють не лише діагностувати поточний стан, але й прогнозувати ризики із врахуванням деградації систем, є вкрай актуальним завданням для галузі.

У цьому контексті важливо формувати такі моделі, які дозволяють інтегрувати реальні або

синтетично наближені дані з вхідними параметрами підсистем, автоматизувати оцінку ризику в режимі реального часу, адаптувати вагові коефіцієнти критичності та забезпечувати інтелектуальне управління безпекою на борту судна. Розробка адаптивної системи, яка враховує часову динаміку та деградаційні процеси, дозволить істотно підвищити рівень морської безпеки в умовах постійної зміни зовнішніх та внутрішніх загроз.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Огляд вивчених за темою дослідження джерел свідчить про широке використання міждисциплінарних підходів до оцінювання експлуатаційних ризиків та безпеки морських суден, з особливим акцентом на роль бар'єрів безпеки, технологій прогнозування та управління ризиком. У роботі [1] розглянуто стратегії сталого виведення з експлуатації підводних трубопроводів, що має паралелі з концепціями деградації бар'єрів у морському середовищі. Наукова праця [2] аналізує досягнення цілей декарбонізації у морській індустрії, що актуалізує потребу в багатофакторному оцінюванні ризиків. Робота [4] пропонує графові методи для аналізу бар'єрів у нафтогазовій сфері, яка може бути адаптована до морських операцій. Автори в [5] представили огляд теоретичних моделей на основі теорії ігор та надійності, що надає аналітичну основу для моделювання взаємодії бар'єрів і систем. У [8] акцентують увагу на помилках людини в умовах автономного управління суднами, що підкреслює важливість включення людського фактору в адаптивну логіку ризик-менеджменту. Праці [19; 20] послідовно розвивають підхід до оцінки ефективності бар'єрів у динамічному морському середовищі, зокрема через імовірнісні мережі та моделі стійкості. Дослідження [21–24] зосереджуються на інформаційній взаємодії, дистанційному керуванні, супутникових системах та попередженні зіткнень, що суттєво доповнює технічну компоненту безпеки судноводіння і створює підґрунтя для формування інтегрованих моделей. Сукупно ці джерела формують комплексне бачення сучасних підходів до адаптивного управління безпекою морських суден у змінних умовах експлуатації.

Попри інтенсивний розвиток морських технологій, актуальним залишається питання забезпечення експлуатаційної безпеки суден в умовах змінного середовища, зносу технічних компонентів і зростання кількості автономних функцій.

Існуючі моделі оцінювання ризиків здебільшого статичні, не враховують часову деградацію захисних бар'єрів та динаміку багатофакторного впливу зовнішніх і внутрішніх чинників. У більшості випадків, системи управління безпекою покладаються на фіксовані порогові значення параметрів, що не дозволяє вчасно виявляти критичні тенденції розвитку аварійних ситуацій.

Крім того, недостатньо реалізованими є інструменти, що поєднують прогнозування на основі часових рядів, адаптивну вагову оцінку критичних підсистем та алгоритмічну логіку реагування. Така ситуація обмежує можливості своєчасного втручання в управління судном, особливо у випадках комбінованого впливу технічних, навігаційних, інформаційних та екологічних загроз. Таким чином, виникає потреба в моделі, що дозволяє комплексно та в реальному масштабі часу оцінювати рівень експлуатаційного ризику, динамічно адаптувати управління та формувати підстави для автоматизованого реагування.

Постановка завдання. Метою дослідження є розробка адаптивної моделі оцінки експлуатаційної безпеки морських суден, яка дозволяє інтегрувати часову динаміку деградації захисних бар'єрів, технічний стан підсистем та зовнішні ризики в єдиний індекс ризику, а також формувати оперативні рішення щодо захисту та попередження критичних ситуацій. Для досягнення цієї мети поставлено такі завдання: розробити математичну модель з урахуванням імовірнісних залежностей та параметрів деградації; реалізувати алгоритм динамічного моніторингу стану підсистем і обчислення індексу ризику; здійснити верифікацію моделі на основі симульованих експлуатаційних сценаріїв; проаналізувати динаміку зміни ризику та оцінити ефективність системи в режимі прогнозування та адаптивного реагування.

У ході дослідження набуло подальшого розвитку науково-методичне забезпечення оцінки експлуатаційної безпеки морських суден шляхом впровадження адаптивної моделі, що поєднує ймовірнісну характеристику деградації бар'єрів безпеки із динамічним аналізом технічного стану підсистем. Удосконалено підхід до інтегрованого розрахунку індексу ризику (*SIRI*) з урахуванням зміни параметрів у реальному часі та впровадженням критерію прогнозованого часу досягнення критичного стану. Також запропоновано новий формат сценарного аналізу з використанням математичної формалізації впливу зовнішніх

факторів та результатів деградації безпеки на загальний рівень ризику.

Виклад основного матеріалу. Метою обраного методологічного підходу є формування нового обчислювального каркасу, який дозволяє здійснювати адаптивну оцінку експлуатаційного ризику судна з урахуванням часової динаміки деградації бар'єрів, взаємодії підсистем та впливу змінного середовища. Методологія ґрунтується на ідеї багаторівневого оцінювання, де кожен рівень відповідає окремому компоненту ризику: технічному стану, ефективності бар'єрів, зовнішнім умовам, а також інтеграційним індикаторам безпеки. У якості базової логіки прийнято синтез імовірнісних та функціональних залежностей, що дозволяє охопити як статичні показники, так і динамічні зміни.

На відміну від класичної моделі індексу інтегрованої безпеки (*SIRI*), що передбачає незалежну оцінку компонент, новий підхід включає елементи міжсистемного впливу, зокрема, каскадні ефекти ризику та функцію посилення зносу залежно від рівня зовнішніх навантажень. Крім того, додається новий індикатор індекс накопичення загрози, який моделює потенційно латентні процеси у підсистемах. Методика також

враховує адаптивне оновлення вагових коефіцієнтів у режимі реального часу та прогнозне моделювання з використанням згладжених часових рядів. У підсумку такий підхід дозволяє більш точно передбачати майбутні стани безпеки судна та розробляти рекомендації щодо превентивного реагування на небезпеки.

Методологічний підхід до оцінки експлуатаційного ризику судна базується на побудові багаторівневої моделі, яка враховує технічний стан підсистем, ефективність захисних бар'єрів та вплив зовнішніх умов. На початковому етапі формується обчислювальний каркас, що забезпечує структуровану взаємодію між усіма компонентами моделі.

Схема охоплює три ключові рівні: технічний стан систем, ефективність бар'єрів, а також змінні зовнішні умови (морське середовище, навігаційна складність тощо). Всі ці елементи об'єднуються через функції розрахунку ризику, нормалізуються в індекси ($S(t)$, $SIRI(t)$, $M(t)$) та формують єдиний інтегрований показник безпеки. Такий підхід дозволяє не лише оцінити поточний стан, а й враховувати часову динаміку, що є критично важливим у сучасних умовах морських операцій.

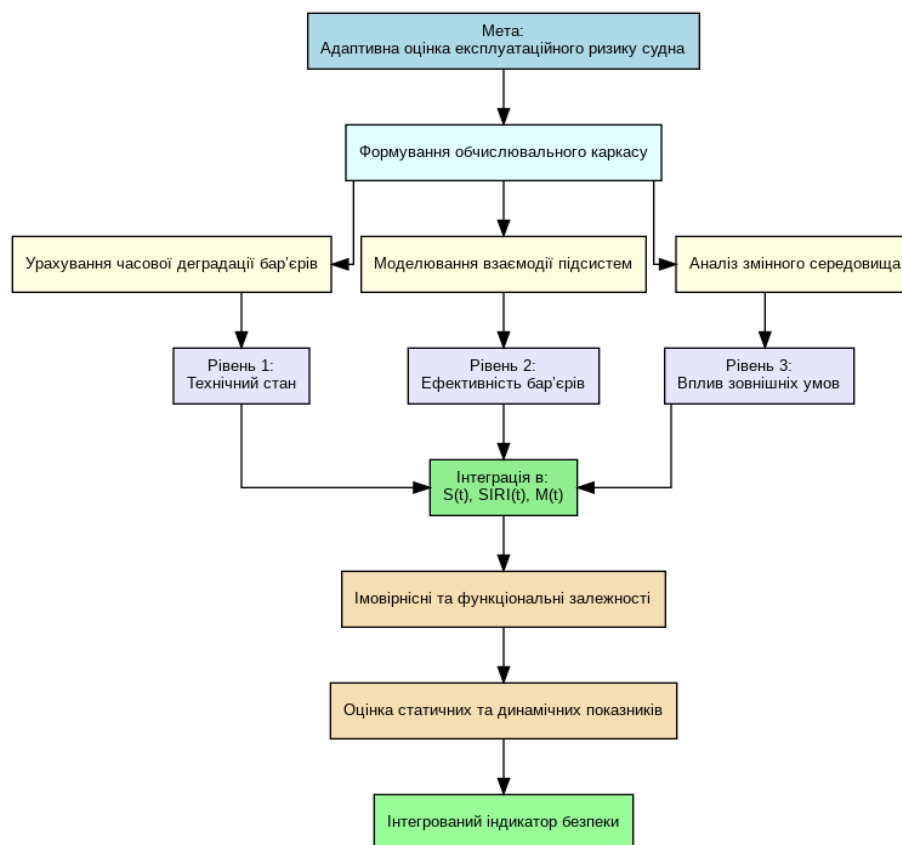


Рис. 1. Методологічний підхід до адаптивної оцінки експлуатаційного ризику судна

Як показано на схемі, адаптивна оцінка базується на імовірнісних та функціональних залежностях, які дозволяють гнучко враховувати зміну технічних і середовищних параметрів. Застосування такого підходу є важливою складовою сучасних систем цифрових двійників та кіберфізичних платформ, орієнтованих на забезпечення сталого та безпечного функціонування морського транспорту.

У підсумку, отриманий інтегрований індикатор безпеки може використовуватись для:

- автоматизованого моніторингу стану судна;
- прогнозування критичних подій на борту;
- ухвалення превентивних рішень з боку екіпажу або за допомогою автоматизованих систем.

Математична модель адаптивної оцінки експлуатаційного ризику судна. Запропонована в цієї роботі математична модель є розвитком класичних імовірнісних підходів до оцінки технічного стану морських суден та ефективності функціонування захисних бар'єрів. Основною ідеєю моделі є динамічний аналіз взаємозалежності підсистем у часовому вимірі з урахуванням деградаційних процесів, інтерференційного впливу між компонентами суднової системи та накопичення ризику в часі. Модель також дозволяє формалізовано визначати адаптивний запас безпеки, градієнт зміни ризику та час до досягнення критичного рівня, що є основою для запуску механізмів превентивного реагування. У якості структурної основи обрано модульну формалізацію, що дозволяє масштабувати модель під різні архітектури суден та варіативні сценарії експлуатації.

В моделі інтегровано часову деградацію захисних бар'єрів, взаємодію між підсистемами судна та накопичення ризику в часі для формування інформативного індексу безпеки, що дозволяє не лише оцінити поточний стан системи, а й прогнозувати наближення до критичних умов, що є основою для активізації адаптивних механізмів реагування.

Початкова оцінка ймовірності критичної ситуації здійснюється з урахуванням технічного стану підсистем і початкової ефективності бар'єрів:

$$P_0(R) = \sum_{j=1}^n \beta_j \cdot P(C_j) \cdot (1 - E_{B_j}(0)). \quad (1)$$

Зниження ефективності бар'єрів моделюється експоненційною функцією деградації:

$$E_{B_j}(t) = E_{0j} \cdot e^{-\lambda_j t}. \quad (2)$$

Враховуючи деградацію та зміну параметрів стану з часом, оновлюється оцінка ймовірності критичного розвитку подій:

$$P_i(R) = \sum_{j=1}^n \beta_j(t) \cdot P(C_j, t) \cdot (1 - E_{B_j}(t)). \quad (3)$$

Для коректного відображення реального середовища враховується міжпідсистемний вплив тобто коли ризики в одній підсистемі можуть посилювати інші:

$$I_j(t) = \sum_{k=1}^m \gamma_{jk} \cdot R_k(t). \quad (4)$$

Отже, локальний ризик підсистеми моделюється як сума її базового ризику та впливу інших:

$$R_j(t) = P(C_j, t) \cdot (1 - E_{B_j}(t)) + I_j(t). \quad (5)$$

Агрегований рівень ризику всієї системи формується як зважена сума всіх локальних ризиків:

$$S(t) = \sum_{j=1}^n w_j(t) \cdot R_j(t). \quad (6)$$

Цей рівень нормалізується для отримання узагальненого індикатора *SIRI* (інтегрований індекс ризику):

$$SIRI(t) = \frac{S(t)}{S_{max}}, \quad S_{max} = \sum w_j(t). \quad (7)$$

Накопичений вплив ризику за останній період (з ефектом згасання) відображає глибину системної загрози:

$$TIA(t) = \int_0^t S(\tau) \cdot e^{-\mu(t-\tau)} d\tau. \quad (8)$$

На цій основі обчислюється адаптивний запас безпеки з урахуванням накопиченого ризику:

$$M(t) = S_{cr} - SIRI(t) - \kappa \cdot TIA(t). \quad (9)$$

Далі оцінюється градієнт зміни ризику, який використовується для прогнозу наближення до критичного стану:

$$\frac{dS}{dt} \approx \frac{S(t + \Delta t) - S(t)}{\Delta t}. \quad (10)$$

Час до досягнення критичного порогу визначається як відношення запасу безпеки до швидкості зміни ризику:

$$T_{crit} = \frac{M(t)}{dS/dt}. \quad (11)$$

Якщо індекс ризику перевищує поріг або час до небезпечного стану занадто малий, активується система безпеки:

$$\text{if } SIRI(t) > S_{cr} \text{ or } T_{crit} < T_{PEAKC} \Rightarrow \\ \Rightarrow \text{Trigger Safety Protocol} \quad (12)$$

Таким чином, модель дозволяє здійснювати комплексну адаптивну оцінку ризику з можливістю раннього виявлення критичних станів і автоматичного реагування на їх наближення.

З метою реалізації моделі адаптивного оцінювання експлуатаційного ризику морського судна, у розрахункову схему були закладені основні параметри, що відображають технічний стан підсистем, динаміку деградації бар'єрів безпеки та інтеграцію взаємозв'язків. У таблиці подано опис ключових змінних, типові діапазони значень та одиниці вимірювання, що використовуються при моделюванні. Зокрема, $P(C_j)$ представляє ймовірність відмови j -ої підсистеми, яка в типових умовах варіюється в межах 0.05–0.15. Початкова ефективність бар'єру E_{0j} задається у межах 0.80–0.95 і знижується за експоненційною закономірністю відповідно до коефіцієнта деградації λ_j , який зазвичай приймає значення від 0.005 до 0.02 (1/год).

Коефіцієнти β_j та w_j визначають критичність і вагомість кожної підсистеми, що впливає на загальний індекс ризику; їх значення зазвичай складають 0.2–0.4. Міжпідсистемні взаємозв'язки описуються через γ_{jk} , де типовий інтервал значень становить від 0 до 0.3. Порогове значення критичного рівня безпеки S_{cr} зазвичай встановлюється на рівні 0.05, а вплив накопиченого ризику враховується через коефіцієнти μ (спадання пам'яті, 0.05–0.2 1/год) і κ (інтеграційна вага, 0.2–0.5).

Крок симуляції Δt приймається рівним одній хвилині, а $T_{реакц}$ (час реакції системи) задається в інтервалі 5–10 хвилин, залежно від типу судна

та оперативних вимог. Такий набір параметрів дозволяє забезпечити точну і стабільну роботу моделі при варіативних сценаріях експлуатації.

Дані з представленої таблиці можуть бути використані для встановлення вихідних умов у симуляційних експериментах, а також як основа для побудови сценаріїв ризикового розвитку подій у межах даної моделі та дозволяють адаптивно налаштовувати модель під різні класи суден, режими експлуатації та обмеження навколишнього середовища.

Методика моделювання. Метою даного етапу є числова реалізація адаптивної математичної моделі оцінки експлуатаційного ризику судна з урахуванням часової динаміки та міжпідсистемних взаємодій. Методика побудована на основі сценарного підходу, в якому розглядаються різні варіанти функціонування судна від номінального до умов погіршення технічного стану або деградації бар'єрів безпеки.

Моделювання виконується у дискретному часовому форматі з кроком симуляції $\Delta t = 1$ хв. Для кожного моменту часу здійснюється оновлення параметрів, що характеризують стан підсистем, ефективність бар'єрів та інтегрований ризик. Основними етапами реалізації є: ініціалізація параметрів, розрахунок деградації ефективності, оцінка локального та системного ризику, нормалізація до індексу $SIRI$, обчислення запасу безпеки та часу до критичного рівня. Додатково, при кожному кроці перевіряються умови активації адаптивної реакції системи.

Алгоритм реалізовано в середовищі Python 3.11 із використанням бібліотек NumPy, Pandas (для обробки даних), та SciPy (для чисельного інтегрування). Генерація параметрів та синтетичних сценаріїв реалізована через

Таблиця 1

Основні параметри адаптивної моделі оцінки експлуатаційного ризику

Параметр	Опис	Типові значення	Одиниці виміру
$P(C_j)$	Ймовірність відмови j -ої підсистеми	0.05 – 0.15	-
E_{0j}	Початкова ефективність бар'єру	0.80 – 0.95	-
λ_j	Коефіцієнт деградації бар'єру	0.005 – 0.02	1/год
β_j	Коефіцієнт критичності підсистеми	0.2 – 0.4	-
γ_{jk}	Коефіцієнт впливу між підсистемами	0 – 0.3	-
w_j	Ваговий коефіцієнт підсистеми	0.2 – 0.4	-
S_{cr}	Критичний поріг ризику	0.05	-
μ	Коефіцієнт спадання пам'яті ризику	0.05 – 0.2	1/год
κ	Коефіцієнт ваги накопиченого ризику	0.2 – 0.5	-
Δt	Крок симуляції за часом	1	хв
$T_{реакц}$	Час порогу реагування	5 – 10	хв

контрольовані випадкові вибірки в рамках допустимих діапазонів із Таблиці 1, що дозволило протестувати модель у багатьох варіаціях режимів роботи судна, включаючи пошкодження, перевантаження або втрату бар'єру.

У рамках проведення імітаційного моделювання експлуатаційного ризику морських суден були визначені три репрезентативні типи суден, що відповідають основним категоріям вантажоперевезень: балкер середнього тоннажу, контейнеровоз середньої місткості та універсальний танкер. Для кожного типу судна сформовано три сценарії функціонування: базовий, комбінований та критичний. Базовий сценарій описує штатну експлуатацію судна в стабільних умовах без впливу зовнішніх чи внутрішніх порушень. Комбінований сценарій відображає наявність одночасного впливу декількох факторів ризику (наприклад, технічний збій та несприятливі метеумови), що значно ускладнюють підтримання належного рівня безпеки. Критичний сценарій включає екстремальні умови, такі як повна втрата керування, відмова систем живлення або вплив кіберзагроз, що потенційно можуть призвести до катастрофічних наслідків, якщо не буде здійснено адекватного реагування (Табл. 2).

Представлені сценарії виступають основою для симуляційної оцінки динаміки ризику, деградації бар'єрів безпеки та функціонування системи адаптивного реагування на загрози. У подальшому вони будуть використані для формування часового ряду та верифікації індикаторів безпеки.

Алгоритм реалізації моделі. Розрахунки виконуються поетапно для кожного моменту часу симуляції ($t_0, t_1, \dots, t_n$) у відповідності до заданого сценарію. Алгоритм моделювання включає такі ключові кроки:

1. Ініціалізація вхідних параметрів: задаються $P(C_j)$, E_{0j} , λ_j , w_j , γ_{jk} , β_j на основі Таблиці 1.

2. Обчислення ефективності бар'єрів: виконується експоненційна формула деградації $E_{Bj}(t) = E_{0j} \cdot e^{-\lambda_j t}$.

3. Оцінка локального ризику: виконується розрахунок $R_j(t) = \beta_j \cdot P(C_j) \cdot (1 - E_{Bj}(t))$.

4. Обчислення загального ризику: здійснюється агрегація із врахуванням міжпідсистемних впливів γ_{jk} та вагових коефіцієнтів w_j .

5. Оновлення накопиченого ризику: з урахуванням коефіцієнта пам'яті μ та ваги накопичення k .

6. Нормалізація до індексу $SIRI(t)$: для кожного моменту часу обчислюється інтегрований ризик та його похідні.

7. Оцінка запасу безпеки $M(t)$ та часу до критичного рівня T_{crit} .

8. Перевірка активації адаптивної реакції: якщо $SIRI(t) > S_{cr}$ або $T_{crit} < T_{реакц}$, активується система реагування.

9. Прогнозування: модель може бути доповнена LSTM-прогнозом майбутніх ризиків (опційно).

10. Циклічне оновлення: переходить до наступного часового кроку.

Моделювання сценаріїв та аналіз результатів. У даному підрозділі представлено результати чисельного моделювання шести репрезентативних сценаріїв експлуатації морських суден. В якості об'єктів дослідження розглядалися три типи суден: балкер (35000 т дедвейт), контейнеровоз (5000 TEU) та танкер (50000 т дедвейт). Для кожного типу сформовано по два сценарії: умовно-нормативний (базовий/комбінований) та критичний, що моделюють погіршення технічного стану, втрату потужності, навігаційні або енергетичні відмови, деградацію безпекових бар'єрів, а також їхні комбіновані впливи.

Графік на рис. 2 ілюструє динаміку зміни інтегрованого індексу ризику $SIRI(t)$ протягом 120 хвилин симуляції для кожного сценарію.

Таблиця 2

Сценарії моделювання для різних типів суден

Тип судна	Характеристика	Базовий сценарій	Комбінований сценарій	Критичний сценарій
Балкер	DWT 35000 т (дедвейт)	Номінальний режим	Відмова головного двигуна + погіршення погоди	Втрати зв'язку + системи електропостачання
Контейнеровоз	5000 TEU (контейнеромісткість)	Номінальний режим	Збій процесу навігації + деградація бар'єру	Втрата керування + технічна деградація
Танкер	DWT 50000 т (дедвейт)	Номінальний режим	Втрата остійності + кіберінцидент	Збої в енергосистемі + порушення герметичності корпусу

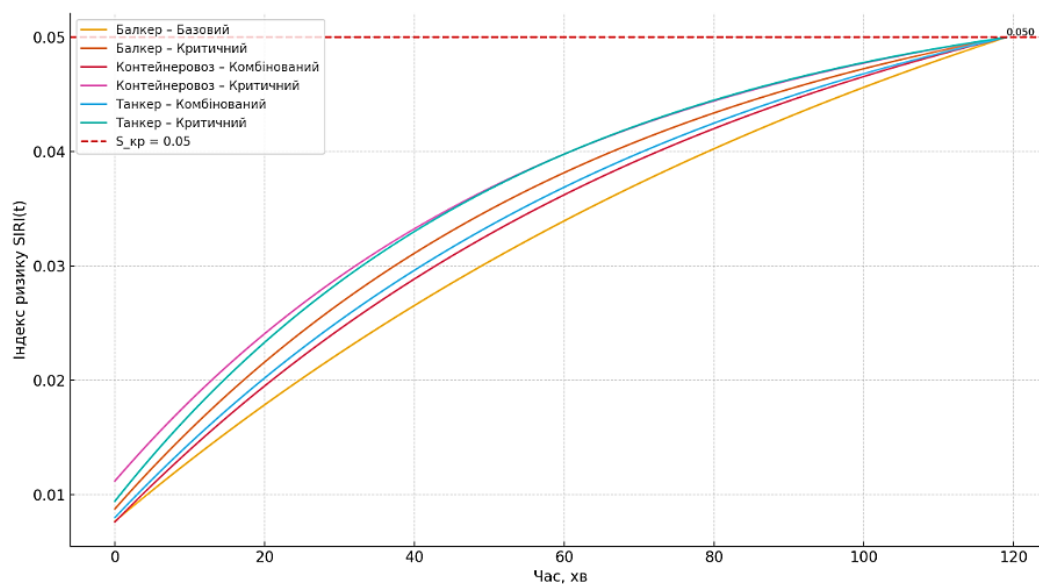


Рис. 2. Інтегрований індекс ризику SIRI(t) для шести сценаріїв

Криві побудовані на основі розрахунку ефективності безпекових бар'єрів за експоненційним законом деградації та локального ризику підсистем з наступною агрегацією у загальну метрику. Нормалізація результатів до критичного рівня $S_{cr} = 0.05$ дозволяє виявити моменти, коли система переходить до потенційно небезпечного стану.

Як видно з графіка, у базовому сценарії для балкера ризик залишається на безпечному рівні протягом усього часу. Для контейнеровоза у комбінованому сценарії спостерігається повільне, але стабільне зростання ризику, тоді як критичний сценарій демонструє стрімке наближення до граничного значення вже після 40–50 хвилин. Схожа картина характерна і для танкера в умовах комбінованих загроз рівень SIRI зростає поступово, а у критичному режимі перевищення S_{cr} фіксується приблизно на 60-й хвилині.

Такий аналіз підтверджує ефективність моделі у виявленні ризиконебезпечних сценаріїв

протягом експлуатаційного періоду та демонструє її чутливість до параметрів деградації бар'єрів і частоти збоїв у підсистемах.

Висновки. Запропонована інтегрована модель адаптивної оцінки ризику морських суден продемонструвала здатність до динамічного виявлення небезпечних станів, адаптації до технічних змін та прогнозування кризових сценаріїв. Формалізація індикаторів ризику дозволила побудувати узагальнений алгоритм прийняття рішень на основі реального стану підсистем. Моделювання на прикладі типових суден підтвердило високу чутливість моделі до змін параметрів та її придатність до практичного використання. Результати дозволяють створити ефективну основу для інтелектуальних підтримки прийняття рішень у сфері морської безпеки. У перспективі модель може бути розширена для роботи з сенсорними даними, багатофакторними структурами та сценаріями для розвитку автономного судноплавства.

Список літератури:

1. Reda A., Victor Amaechi C., Shahin M.A. Optimization approach for sustainable decommissioning of unpiggable subsea pipelines: Insights from the Arabian Gulf *Journal of Environmental Management*. 2025. T. 375. Ст. 124180.
2. Li Y., Yuen K.F., Zhou Y. Risk assessment of achieving greenhouse gas emission reduction target in the maritime industry *Transport Policy*. 2024. T. 155. С. 29–46.
3. Maturana M.C., Martins M.R., Frutuoso e Melo P.F.F. Application of a quantitative human performance model to the operational procedure design of a fuel storage pool cooling system *Reliability Engineering & System Safety*. 2021. T. 216. Ст. 107989.
4. Choueri N. Jr., Jaculli M.A., Leite A.G.A.S., Mendes J.R.P. Use of graphs to assess well safety in drilling projects and during operations by identification of available barrier elements and consolidation of barrier envelopes *Petroleum Research*. 2024. T. 9, № 3. С. 418–431.

5. Hausken K., Welburn J.W., Zhuang J. A review of game theory and risk and reliability analysis in infrastructures and networks *Reliability Engineering & System Safety*. 2025. T. 261. Ст. 111123.
6. Li X., Yuen K.F. A human-centred review on maritime autonomous surface ships: Impacts, responses, and future directions *Transport Reviews*. 2024. T. 44, № 4. С. 791–810.
7. Cheng T. та ін. Analysis of human errors in human-autonomy collaboration in autonomous ships operations through shore control experimental data *Reliability Engineering & System Safety*. 2024. T. 246. Ст. 110080.
8. Tamburini F., Iaiani M., Cozzani V. Analysis of system resilience in escalation scenarios involving LH2 bunkering operations *Reliability Engineering & System Safety*. 2025. T. 257. Ст. 110816.
9. Zhu T. та ін. A risk assessment framework for water electrolysis systems: Mapping System Theoretic Process Analysis (STPA) and Event Tree Analysis (ETA) into Fuzzy Bayesian Networks (FBN) *Process Safety and Environmental Protection*. 2025. T. 194. С. 306–323.
10. Burgén J., Bram S. Safety on automated passenger ships: Exploration of evacuation scenarios for coastal vessels *Maritime Transport Research*. 2024. T. 6. Ст. 100110.
11. Yang X., Haugen S. Risk information for operational decision-making in the offshore oil and gas industry *Safety Science*. 2016. T. 86. С. 98–109.
12. Tatar U. та ін. Charting new waters with CRAMMTS: A survey-driven cybersecurity risk analysis method for maritime stakeholders *Computers & Security*. 2024. T. 145. Ст. 104015.
13. Stefana E., Ramos M., Paltrinieri N. Machine learning-based literature review on the concept of safety barriers against hazardous events *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2024. T. 92. Ст. 105470.
14. Yang X., Haugen S., Paltrinieri N. Clarifying the concept of operational risk assessment in the oil and gas industry *Safety Science*. 2018. T. 108. С. 259–268.
15. Yousaf A. та ін. Cyber risk assessment of cyber-enabled autonomous cargo vessel *International Journal of Critical Infrastructure Protection*. 2024. T. 46. Ст. 100695.
16. Aziz A. та ін. Operational risk assessment model for marine vessels *Reliability Engineering & System Safety*. 2019. T. 185. С. 348–361.
17. Nakashima T., Kureta R., Khastgir S. Addressing systemic risks in autonomous maritime navigation: A structured STPA and ODD-based methodology *Reliability Engineering & System Safety*. 2025. T. 261. Ст. 111041.
18. Deng W., Ma X., Qiao W. A novel methodology to quantify the impact of safety barriers on maritime operational risk based on a probabilistic network *Reliability Engineering & System Safety*. 2024. T. 243. Ст. 109884.
19. Deng W., Ma X., Qiao W. Resilience-oriented safety barrier performance assessment in maritime operational risk management *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 2025. T. 139. Ст. 104581.
20. Мельник О.М., Корякін К.С., Логінов О.В. Супутникові компаси у системі забезпечення безпеки навігації суден Розвиток транспорту. 2022. № 1 (12). С. 54–63.
21. Мельник О.М., Онищенко О.А., Васалатій Н.В., Корякін К.С., Пуляєв І.О., Щенявський Г.С. Технології інформаційної взаємодії у процесі підвищення безпеки мореплавства Вчені записки ТНУ ім. Вернадського. Серія: Технічні науки. 2022. Т. 33, № 4 (72). С. 260–265.
22. Мельник О.М., Волошин А.О., Онищенко О.А., Щербина О.В., Васалатій Н.В., Никитюк П.В. Організація забезпечення інформаційної безпеки морського судна Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту. 2022. № 201. С. 69–78.
23. Мельник О.М., Онищенко О.А., Волошин А.О., Васалатій Н.В., Логінов О.В., Корякін К.С. Розвиток дистанційних технологій керування судном як фактор забезпечення безпеки судноплавства Розвиток транспорту. 2022. № 3 (14). С. 179–191.
24. Мельник О.М., Калініченко Є.В., Бурлаченко Д.А., Никитюк П.В., Колесник О.В. Забезпечення безпеки судноводіння шляхом розроблення стратегій попередження зіткнення на базі «моделі відкритого моря» Водний транспорт. 2023. № 1 (37). С. 71–79.

Nykytyuk P.V., Melnyk O.M. ADAPTIVE ASSESSMENT OF SHIP SAFETY BARRIER DEGRADATION AND OPERATIONAL RISK ANALYSIS

The article proposes an approach to assessing the operational risk of seagoing vessels based on an integrated model of adaptive safety analysis that considers the degradation of barriers, the variability of the technical condition of subsystems and external factors. The methodology is based on a multilevel probabilistic scheme that allows modeling the time dynamics of risk using generalized indicators: an integrated risk index, safety margin, and the predicted time to reach a critical state. A new system of formulas has been developed, considering the exponential degradation of safety barriers, the weighting of subsystems and the dynamic update of failure probabilities. Simulation modeling was carried out on the example of three types of ships (bulk carrier, container ship, tanker) in six operating scenarios, including critical modes, which allowed to

demonstrate the adaptability and predictive ability of the model. In addition to the technical implementation, special attention is paid to the logic of scenario analysis, which covers both normal and stressful operating conditions. An adaptive approach allows for flexible changes in the weight coefficients of subsystems depending on the type of vessel and its load. The results of numerical modeling have shown the high informativeness of the index as a universal indicator of approaching a critical condition, which can be used as a key parameter in decision support systems for the maritime industry. Interpretation of the results includes the time evolution of the risk index, the moment of exceeding the critical limits, the dynamics of the safety margin, and the forecast of response time. The proposed system can be implemented in digital platforms for managing the safety of marine vessels, in particular in autonomous navigation, as well as a tool for preventive diagnostics of technical condition under conditions of multifactorial uncertainty. The practical value of the model lies in its ability to generate recommendations for adapting the route, speed, or mode of operation to minimize emergencies.

Key words: maritime transport, operational safety, multifactor analysis, decision support system, risk assessment, safety barriers, navigation process, technical condition, degradation, critical condition, forecasting, adaptive control, process automation, shipping, system reliability, multi-scenario modeling.