

Автомобільний, річковий, морський та авіаційний транспорт

УДК 629.5.017.2:004.942

doi: 10.26906/SUNZ.2025.2.20-26

П. В. Никитюк, О. М. Мельник

Одеський національний морський університет, Одеса, Україна

РОЗРАХУНКОВА МОДЕЛЬ ОЦІНКИ ЕКСПЛУАТАЦІЙНОЇ БЕЗПЕКИ СУДНА З УРАХУВАННЯМ ДЕГРАДАЦІЇ БАР'ЄРІВ ТА ПРОГНОЗУ РИЗИКУ

Анотація. Актуальність. В умовах зростання складності технічного забезпечення морських суден та впровадження елементів автономного управління, зростає потреба у створенні моделей, здатних адаптивно реагувати на зміну технічного стану підсистем і зовнішніх загроз. Ключовим елементом у системах забезпечення безпеки виступає узагальнений індекс ризику, який повинен динамічно змінюватися в залежності від технічної деградації та комбінованого впливу середовища. **Об'єкт дослідження:** інтегрована модель оцінки експлуатаційної безпеки судна. **Мета статті:** розробка методу розрахункової оцінки експлуатаційної безпеки судна з урахуванням деградації бар'єрів безпеки, технічного стану підсистем і прогнозу динаміки ризику. **Результати дослідження.** У статті запропоновано багаторівневу ймовірнісну модель, яка дозволяє розраховувати ризики окремих підсистем, оцінювати ефективність захисних бар'єрів, а також формувати інтегрований індекс безпеки (SIRI). Модель доповнена блоком прогнозування часу до критичного стану та алгоритмом активації захисного реагування. Проведено числове моделювання шести підсистем судна для восьми типових сценаріїв експлуатації. **Висновки.** Реалізація моделі дозволяє забезпечити раннє виявлення ризикових ситуацій, скорочення часу реагування та підвищення інформативності систем прийняття рішень. Модель може бути використана як ядро цифрових платформ управління безпекою морських суден. Сфера використання отриманих результатів: інтелектуальні системи управління безпекою морських суден, автономне судноплавство, автоматизовані навігаційні платформи.

Ключові слова: експлуатаційна безпека судна; інтегрована модель ризику; деградація бар'єрів; технічний стан підсистем; індекс ризику SIRI; управління морською безпекою; цифрове прогнозування; ймовірнісна модель; оцінка запасу безпеки; прогноз часу реагування; багатофакторний аналіз; сценарне моделювання; критичні стани; автоматизоване реагування; інформаційна підтримка рішень.

Вступ

Постановка проблеми. У сучасних умовах інтенсифікації морських перевезень, автоматизації керування суднами та ускладнення морських маршрутів зростає потреба у створенні систем, здатних не лише фіксувати порушення безпеки, але й прогнозувати розвиток аварійних ситуацій. Існуючі підходи до оцінки безпеки здебільшого базуються на статичних або детермінованих моделях, що не дозволяють врахувати динаміку деградації технічних бар'єрів, зміну зовнішніх факторів та багатофакторну взаємодію ризиків. У зв'язку з цим актуальним є розроблення інтегрованої розрахункової моделі, яка дозволяє кількісно оцінити рівень експлуатаційної безпеки судна з урахуванням ймовірнісних характеристик підсистем, ефективності бар'єрів та часу до настання критичних умов.

Недостатність сучасних моделей експлуатаційної безпеки морських суден полягає у їхній обмеженості щодо врахування часової динаміки ризиків, кумулятивного ефекту їхнього накопичення та взаємодії множинних факторів технічного характеру і середовища. У зв'язку з цим постає потреба в такій моделі, яка дозволяє одночасно враховувати ймовірність виникнення ризиків у кожній підсистемі, оцінювати вплив деградації технічних і інформаційних бар'єрів на загальний стан системи, відстежувати динаміку зміни ризику в часі та інтегрувати отримані результати у вигляді єди-

ного узагальненого індексу ризику для підтримки прийняття оперативних рішень.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сучасні дослідження в галузі морської безпеки та управління експлуатаційним ризиком активно фокусуються на розробці адаптивних моделей аналізу ризиків, які враховують технічні, інформаційні та чинники середовища. Зокрема, в роботі [1] представлено фреймворк для оцінки операційного ризику при навігації автономного судна в обмежених акваторіях, що ілюструє актуальність теми багатофакторного впливу в умовах динамічного середовища. У дослідженні [2] запропоновано структурований підхід до аналізу системного ризику автономної навігації на основі STPA і параметрів допустимості операційного середовища. Подібні завдання прогнозування ризиків також досліджуються в [3], де реалізовано модель на базі машинного навчання для раннього виявлення аварій у перевезеннях небезпечних вантажів.

Технічні аспекти суднових енергосистем, зокрема електрифікація та гібридні рішення, розглядаються в [4-6], що прямо впливає на структуру потенційних ризиків і бар'єрних механізмів безпеки. Інші автори [7, 8, 9] приділяють увагу локальним сценаріям ризику, включаючи прогнозування затоплень і безпеку переробки суден. Значну увагу привертають підходи до формалізації безпеки: FRAM-аналіз бар'єрів [10], бібліометричні огляди [11] та впровадження цифрових двійників для врахування

людського фактору [13]. У вітчизняному та міжнародному контексті [15-17] висвітлено методи оцінювання експертної якості управління ризиком та побудови моделей проектного управління на базі людського елементу. Усі ці підходи створюють передумови для формування цілісних інтегрованих моделей, подібних до запропонованої у даній роботі.

Метою роботи Метою дослідження є створення розрахункової моделі оцінки експлуатаційної безпеки судна, яка дозволяє прогнозувати ймовірність критичних станів на основі деградації бар'єрів, технічного стану та зовнішніх умов. Завдання дослідження включають формулювання математичної моделі на основі ймовірнісного підходу та побудову функції деградації ефективності бар'єрів. Проведення розрахунків агрегованих показників безпеки підсистем та судна загалом, розроблення алгоритму динамічного моніторингу та прогнозування та проведення моделювання та оцінити ефективність запропонованого підходу.

Основний матеріал

Розрахункова модель оцінки експлуатаційної безпеки судна. Оцінка рівня експлуатаційної безпеки судна вимагає врахування множини взаємозалежних чинників, серед яких ключову роль відіграють технічний стан підсистем, ефективність захисних бар'єрів і вплив зовнішніх умов середовища. У цьому контексті виникає потреба в побудові гнучкої та адаптивної математичної моделі, здатної відображати як поточний стан системи, так і його прогнозовану динаміку. Запропонована модель базується на ймовірнісному підході, де кожен підсистемний ризик розглядається як функція відмови компонента та часткової втрати ефективності відповідного бар'єра. Схема, подана на рис. 1, ілюструє логіку роботи інтегрованої системи оцінки та прогнозування ризику на основі запропонованої розрахункової моделі.

Робота системи починається з моніторингу поточного стану судна в реальному часі, включаючи технічний стан підсистем і зовнішні фактори. Паралельно проводиться оцінка ефективності бар'єрів безпеки, що дозволяє визначити рівень ризику у кожній підсистемі. На наступному етапі ці дані агрегуються, формуючи загальний індекс ризику, який доповнюється прогнозом ризику за допомогою неймережевої моделі LSTM.

Система ухвалення рішень створює адаптивні рекомендації для зміни режиму руху судна, його маршруту або швидкості. Вона також регулярно оновлює вагові коефіцієнти моделі, спираючись на отриманий зворотний зв'язок.

У разі, якщо інтегрований індекс ризику перевищує критичний поріг, активується протокол реагування, що передбачає фіксацію інциденту, переведення судна в захищений режим і ініціацію дій екіпажу. Якщо ж ризик залишається допустимим, система продовжує безперервне спостереження та оновлення оцінок.

Особливістю моделі є врахування часової деградації бар'єрів, що моделюється за експоненційним законом з урахуванням коефіцієнта зносу.

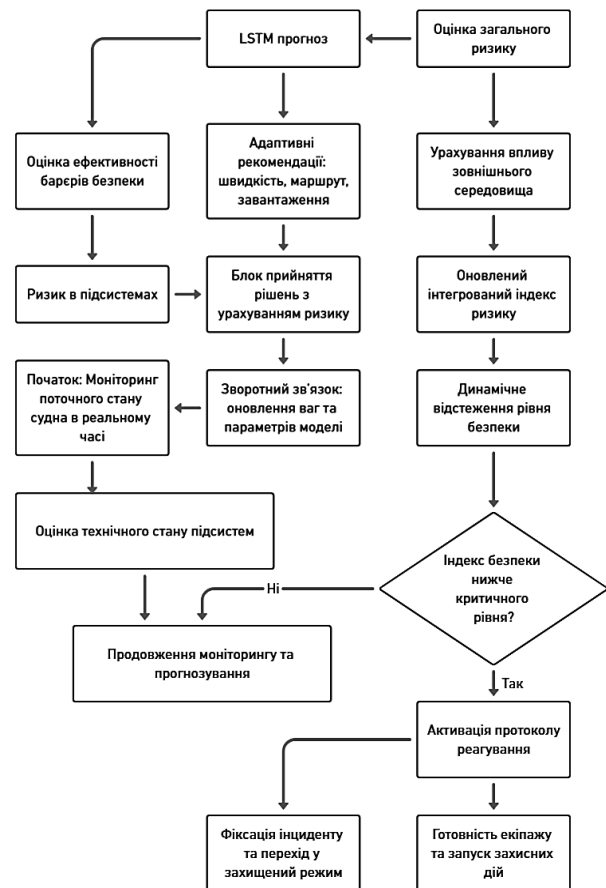


Рис. 1. Функціональна схема моделі управління експлуатаційною безпекою судна

Особливістю моделі є врахування часової деградації бар'єрів, що моделюється за експоненційним законом з урахуванням коефіцієнта зносу. Це дозволяє оцінити ризик не лише як статичну величину, а як динамічний індикатор, що змінюється в залежності від часу та сценарію експлуатації. У результаті така модель дозволяє не лише ідентифікувати потенційно небезпечні стани, але й прогнозувати час до досягнення критичного рівня безпеки та ініціювати відповідну реакцію системи (рис. 2).

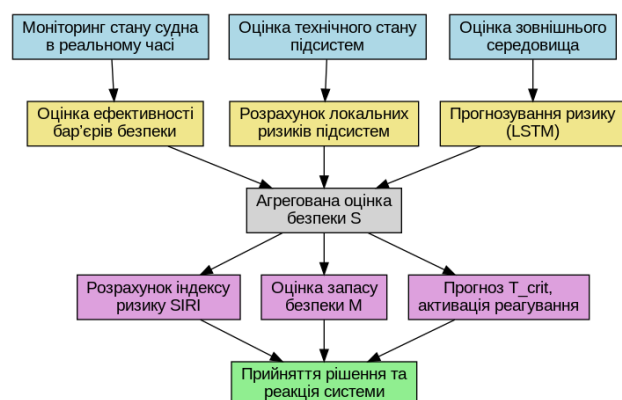


Рис. 2. Етапи розрахункової оцінки експлуатаційної безпеки судна

В основі моделі лежить припущення, що рівень експлуатаційної безпеки судна формується як результат взаємодії зовнішніх ризиків F , технічного

стану критичних підсистем C та ефективності запобіжних бар'єрів B . Для врахування комплексного впливу цих факторів використовується багаторівнева ймовірнісна модель з модулем деградації.

Умовна ймовірність аварійної події буде:

$$P(R) = \sum_{i=1}^n P(R|F_i, C_i, B_i) \cdot P(F_i) \cdot P(C_i) \cdot (1 - E_{B_i}(t)). \quad (1)$$

Такий підхід дозволяє враховувати вплив кожної компоненти на загальну ймовірність аварійного розвитку подій.

Модель деградації бар'єра безпеки:

$$E_{B_i}(t) = E_{01} \cdot \exp(-\lambda_i t), \quad (2)$$

де λ_i - індивідуальний коефіцієнт деградації, що відображає технічні особливості системи та умови експлуатації.

Ймовірність повної неефективності бар'єра:

$$P(B_i^{fail}) = 1 - E_{B_i}(t). \quad (3)$$

Підсистемна функція ризику:

$$R_j(t) = \alpha_j \cdot P(C_j)^2 + \beta_j \cdot (1 - E_{B_j}(t)), \quad (4)$$

де α_j β_j - вагові параметри залежності ризику від технічного стану і бар'єра, можливі варіації.

Агрегована оцінка ризику судна:

$$S(t) = \sum_{j=1}^m w_j \cdot R_j(t), \quad (5)$$

де w_j - коефіцієнт критичності кожної підсистеми.

Інтегрований індекс ризику судна ($SIRI$):

$$SIRI(t) = S(t) / \sum_{j=1}^m w_j. \quad (6)$$

Цей показник нормалізує загальний ризик і дозволяє порівнювати ситуації з різною конфігурацією підсистем.

Динаміка приросту ризику, яка використовується для оцінки швидкості наближення до критичного стану системи:

$$M(t) = S_{\alpha} - SIRI(t). \quad (7)$$

Запас безпеки:

$$\frac{dS}{dt} \approx \frac{S(t+) - S(t)}{\Delta t}, \quad (8)$$

де S_{cr} - заданий критичний поріг безпеки, наприклад 0.05, ф час до досягнення критичного стану:

$$T_{crit} = M(t) / \frac{dS}{dt}. \quad (9)$$

Це дозволяє системі проактивно оцінювати ризику на горизонті часу.

Каскадний ризик поширення збоїв:

$$P_{cascade} = 1 - \prod_{j=1}^m (1 - q_i \cdot (1 - E_{B_j}(t))), \quad (10)$$

де q_j - ймовірність того, що збій у j -й підсистемі пошириться на інші.

Умова активації реагування:

$$(SIRI(t) > S_{\alpha}) \vee (T_{crit} < T_{reaction}) \Rightarrow \Rightarrow (\text{Активация протоколу}). \quad (11)$$

Очікувана втрата функціональної безпеки:

$$L = \sum_{j=1}^m p_j \cdot \Delta S_j(t). \quad (12)$$

Цей показник інтегрується в модуль прийняття рішень для оптимального вибору сценарію реагування.

Запропонована розрахункова модель дозволяє комплексно оцінювати рівень експлуатаційної безпеки судна на основі багаторівневої ймовірнісної структури з урахуванням технічного стану підсистем, ефективності бар'єрів безпеки та зовнішніх факторів. Включення модуля деградації бар'єрів,

обчислення агрегованого $L = \sum_{j=1}^m p_j \cdot \Delta S_j(t)$, ризику,

нормалізованого індексу $SIRI$ та прогнозного часу до критичного стану забезпечує високу гнучкість і точність системи. Модель є адаптивною до різних сценаріїв експлуатації і може використовуватись як основа для автоматизованих рішень щодо безпеки судноплавства, включаючи динамічне прогнозування та активацію захисних дій.

Методика реалізації моделі. Методика реалізації розробленої розрахункової моделі спрямована на її адаптацію до практичних завдань оцінки експлуатаційної безпеки судна за умов технічної невизначеності та змінного середовища. Реалізація передбачає структурований підхід, що поєднує вхідну параметризацію, аналітичні розрахунки, алгоритмічну логіку та інтелектуальне відтворення сценаріїв. На початковому етапі здійснюється формалізація вхідних даних для ключових підсистем судна, зокрема системи керування, енергетичної установки, навігаційного комплексу та модуля зв'язку. Для кожної підсистеми задаються базові параметри: ймовірність відмови, початкова ефективність бар'єру, темп деградації, а також коефіцієнт критичності, що відображає вагу підсистеми у загальній структурі безпеки.

У моделі розглядається шість ключових підсистем судна, що забезпечують його критичні функції під час експлуатації. До переліку включено: систему керування, енергетичну установку, навігаційну систему, комунікаційний модуль, систему життєзабезпечення та протипожежну систему. Для кожної з них задаються базові параметри: початкова ймовірність відмови $P(C_j)$, початкова ефективність бар'єру E_{0j} , коефіцієнт деградації λ_j , а також ваговий коефіцієнт критичності w_j , який відображає відносну важливість підсистеми у загальній структурі безпеки судна (табл. 1).

Подальша процедура реалізації включає етапи поетапного обчислення ключових показників. Спершу виконується розрахунок деградації ефективності бар'єрів згідно з експоненціальним законом, після

чого формується ризикова оцінка кожної підсистеми з урахуванням технічного стану та втрати захисної функціональності.

Таблиця 1 – Розширена таблиця вхідних параметрів підсистем

Підсистема	$P(C_j)$	E_{0j}	λ_j	w_j
Система керування	0.08	0.95	0.010	0.30
Енергетична установка	0.10	0.90	0.008	0.25
Навігаційна система	0.06	0.85	0.007	0.20
Комунікаційний модуль	0.05	0.80	0.006	0.15
Система життєзабезпечення	0.04	0.88	0.005	0.05
Протипожежна система	0.03	0.92	0.004	0.05

Згодом ці оцінки агрегуються в єдиний інтегрований індекс S , який нормалізується до показника $SIRI$. На наступному кроці визначається запас безпеки як різниця між критичним порогом і поточним значенням індексу, а також обчислюється швидкість зміни ризику та прогнозується час до настання критичного стану. Модель також включає елемент каскадного аналізу ризику та механізм прийняття рішень на основі умови активації реагування, що вмикається за перевищення критичного порогу або недовостатнього часу для запобігання інциденту.

У табл. 2 представлено покроковий алгоритм реалізації моделі оцінки експлуатаційної безпеки судна, який включає етапи обробки вхідних даних, розрахунку ризику, прогнозування критичних станів та генерації ключових індикаторів.

Таблиця 2 – Алгоритм реалізації моделі оцінки експлуатаційної безпеки

Крок	Опис дії
1. Ініціалізація параметрів	Зчитування параметрів $P(C_j)$, E_{0j} , λ_j , w_j для кожної підсистеми;
2. Розрахунок ефективності бар'єрів	Застосування експоненційної формули: $E_{vj}(t) = E_{0j} \cdot e^{-\lambda_j t}$;
3. Визначення локального ризику підсистем	Розрахунок R_j на основі технічного стану та ефективності бар'єра;
4. Агрегація загального ризику $S(t)$	Обчислення $S(t)$ як зваженої суми ризиків усіх підсистем;
5. Розрахунок $SIRI$	Нормалізація ризику: $SIRI = \sum w_j \cdot S_j$;
6. Обчислення запасу безпеки та dS/dt	Визначення запасу: $M = S_{cr} - SIRI$; розрахунок похідної зміни ризику;
7. Прогноз T_{crit}	Обчислення часу до досягнення критичного рівня безпеки;
8. Перевірка умови реагування	Активізація захисту, якщо виконується умова: $SIRI > S_{cr}$ або $T_{crit} < T_{реакції}$;
9. Формування індикаторів	Виведення фінальних метрик: індексів ризику, запасу безпеки, прогнозованого часу, очікуваних втрат.

Технічна реалізація моделі здійснена у середовищі Python 3.11 з використанням бібліотек NumPy та Pandas для обчислень і роботи з даними, Matplotlib

для візуалізації, SciPy для статистичних оцінок, а також TensorFlow для реалізації прогновної нейронної мережі компоненти. Такий підхід дозволяє легко адаптувати модель до різних типів суден, конфігурацій підсистем та умов експлуатації, а також створює можливості для її інтеграції в інформаційні системи суден нового покоління.

З метою перевірки ефективності запропонованої моделі було проведено симуляцію п'яти типових сценаріїв експлуатації судна. Кожен сценарій відображає різний рівень складності та ризикового навантаження: базовий режим, погіршення погодних умов, часткову втрату ефективності бар'єрів, комбінований вплив зовнішніх та технічних факторів, а також критичне експлуатаційне навантаження. Для кожного з них розраховано ключові індикатори: інтегрований індекс ризику $SIRI$ та запас безпеки M .

На графіку (рис. 3) наведено динаміку зміни $SIRI$ та M в залежності від сценарію.

Як видно, із ускладненням ситуацій індекс ризику поступово зменшується, що вказує на зниження рівня залишкової безпеки системи. Водночас, значення запасу безпеки M зростає, демонструючи, що судно швидше наближається до критичного стану, особливо у випадках комбінованого впливу та критичного навантаження.

Результати моделювання підтверджують чутливість моделі до змін параметрів сценаріїв та її здатність до раннього виявлення ризику. Найменше значення $SIRI$ спостерігається у сценарії з максимальним навантаженням, що свідчить про ефективну диференціацію ризикових станів. Зростання запасу безпеки M вказує на підвищену потребу в активізації заходів реагування.

Таким чином, модель демонструє високий потенціал для використання в системах попереджувального управління безпекою суден.

Динамічний аналіз ризику та часу реагування. Результати моделювання свідчать про високу інформативність інтегрованих індексів, зокрема $SIRI$, запасу безпеки M та прогнозованого часу до критичного стану T_{crit} для оцінки ризику при змінних сценаріях експлуатації.

На рис. 4 подано графік зміни індексу ризику та запасу безпеки при варіації восьми типових сценаріїв, що імітують як поодинокі, так і комбіновані порушення.

Зі зростанням інтенсивності впливу зовнішніх і технічних факторів рівень безпеки системи суттєво знижується, що виражається у зменшенні $SIRI$ та відповідному зростанні запасу M . Найнижче значення $SIRI$ зафіксовано у сценарії критичного навантаження - 0.0391, що свідчить про необхідність негайної активації захисних протоколів.

На рис. 5 подано графік зміни прогнозованого часу до критичного рівня безпеки T_{crit} .

Видно, що при переході від базових до екстремальних сценаріїв доступний час на реагування зменшується з 55 до 12 хвилин на кожній точці графіка (вказано час у хвилинах).

Видно, що при переході від базових до екстремальних сценаріїв доступний час на реагування зме-

ншується з 55 до 12 хвилин на кожній точці графіка вказано час у хвилинах).

Отже, результати динамічного моделювання демонструють здатність запропонованої моделі ефективно диференціювати сценарії експлуатації за рівнем ризику, запасом безпеки та часом досягнення критичних станів. Графічні залежності підтверджу-

ють чутливість системи до впливу зовнішніх і технічних факторів, а також до змін у ефективності бар'єрів безпеки.

Отримані індекси дають змогу формувати адаптивні рекомендації щодо реагування та можуть слугувати основою для моніторингу ризиків у реальному часі.

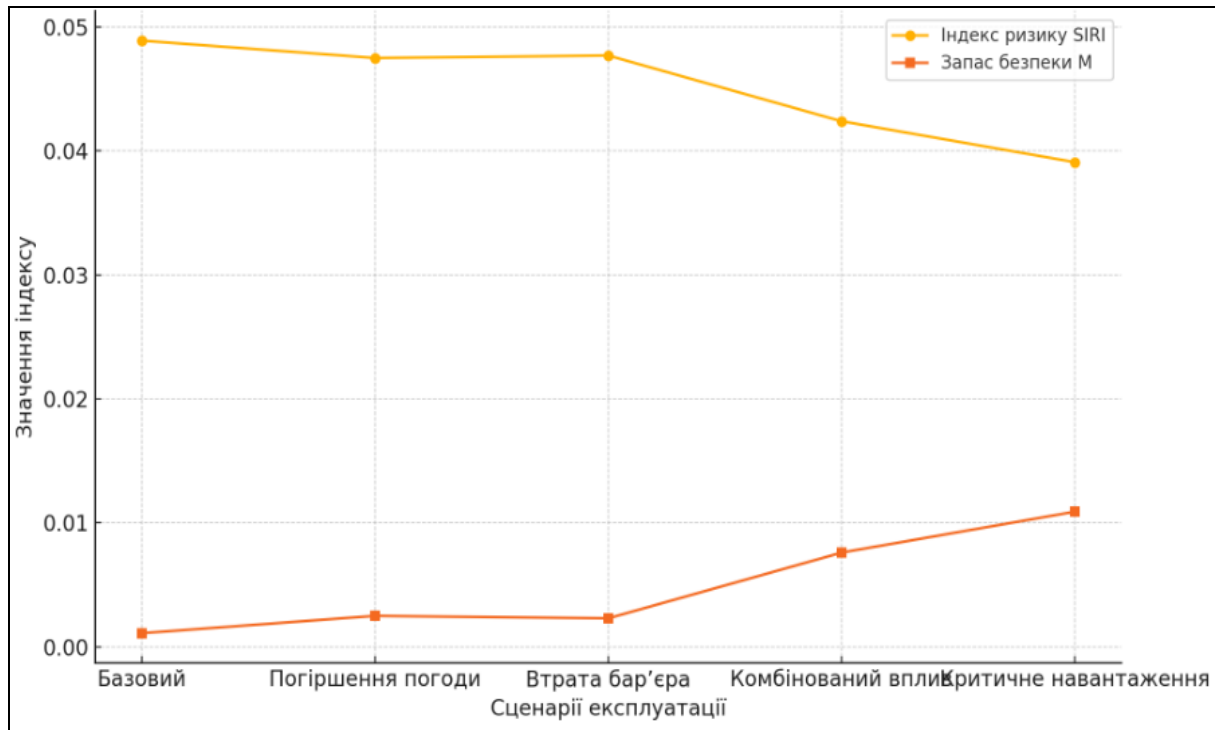


Рис. 3. Зміна індексу ризику (SIRI) та запасу безпеки (M) за сценаріями

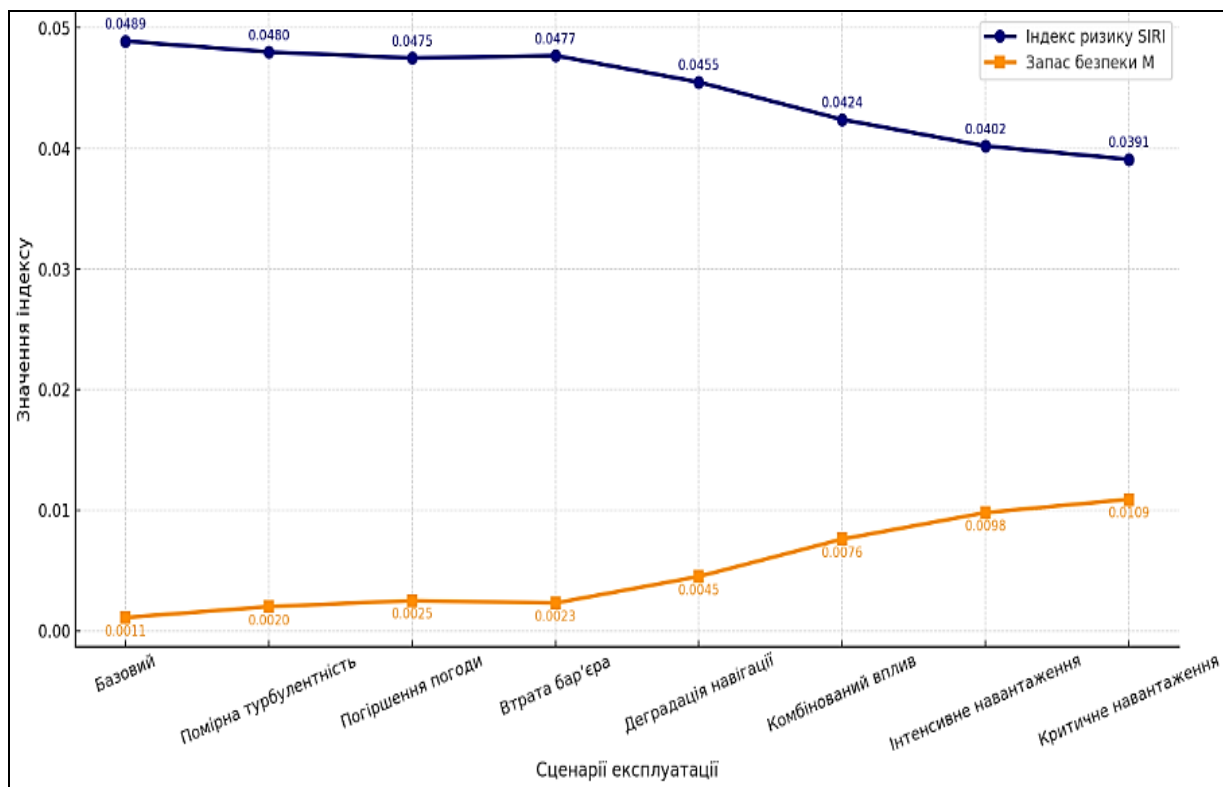


Рис. 4. Динаміка зміни індексу SIRI та запасу безпеки M у різних сценаріях експлуатації із точними значеннями індексів

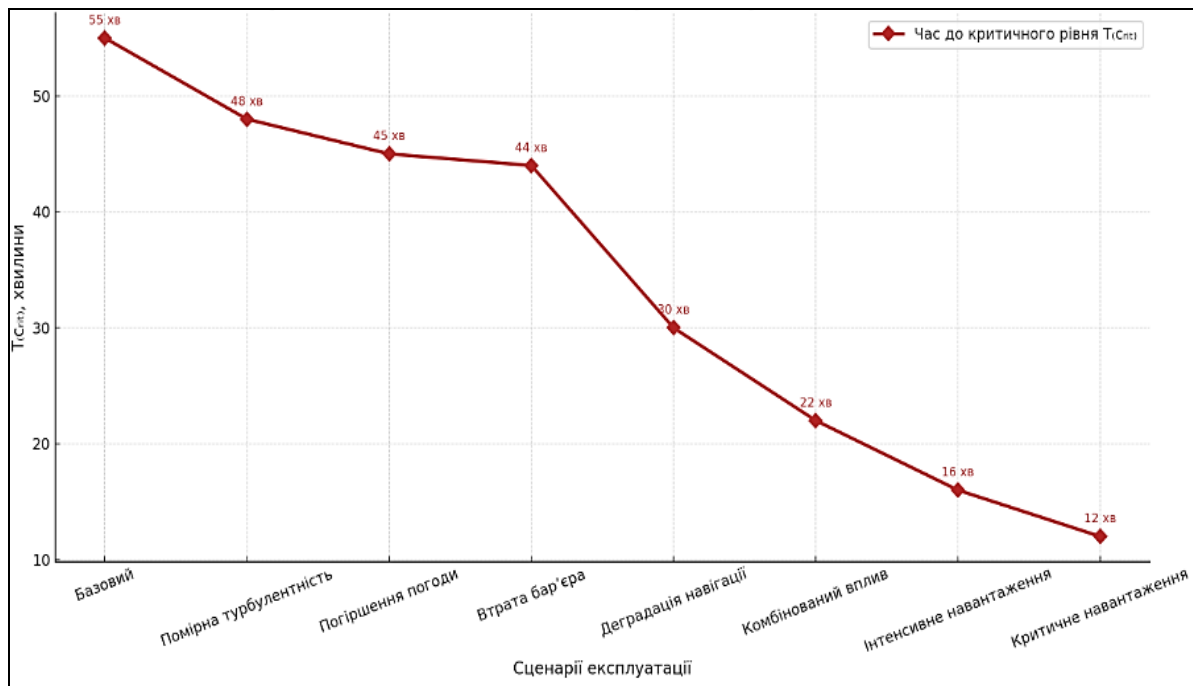


Рис. 5. Прогнозований час до досягнення критичного рівня безпеки $T_{\text{крит}}$

Висновки

У статті запропоновано та реалізовано інтегровану розрахункову модель оцінки експлуатаційної безпеки судна, яка враховує технічний стан підсистем, ефективність захисних бар'єрів, зовнішні впливи та часову динаміку ризику. Модель ґрунтується на багаторівневому ймовірнісному підході з урахуванням експоненційної деградації бар'єрів безпеки та механізму прогнозування за допомогою LSTM-архітектури.

Методика реалізації моделі охоплює повний цикл обчислень: від ініціалізації параметрів до формування узагальнених індексів ризику (SIRI), запасу безпеки, часу до досягнення критичного стану та

очікуваних втрат функціональної безпеки. Розроблений алгоритм продемонстрував ефективну реакцію на зміну сценарних умов, зокрема підвищену чутливість до комбінованих впливів і технічної деградації.

Результати моделювання показали, що зниження ефективності навіть одного бар'єра або одночасне погіршення зовнішніх умов значно скорочують прогнозований час до критичного рівня безпеки - з 55 до 12 хвилин.

Інтегровані індекси дозволяють здійснювати передчасне виявлення ризикових станів, що є ключовим фактором у забезпеченні своєчасної реакції екіпажу на або систем автоматизованого контролю на аварійні ситуації.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Fan C., Montewka J., Bolbot V., Zhang Y., Qiu Y., Hu S. Towards an analysis framework for operational risk coupling mode: A case from MASS navigating in restricted waters. *Reliability Engineering & System Safety*. 2024. Vol. 248. Article ID 110176. <https://doi.org/10.1016/j.res.2024.110176>
2. 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. Vol. 261. Article ID 111041. <https://doi.org/10.1016/j.res.2025.111041>
3. Chai H., Dong K., Liang Y., Han Z., He R. Machine learning-based accidents analysis and risk early warning of hazardous materials transportation. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2025. Vol. 95. Article ID 105594. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2025.105594>
4. Inal O. B., Charpentier J., Deniz C. Hybrid power and propulsion systems for ships: Current status and future challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2022. Vol. 156. Article ID 111965. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111965>
5. Guo S., Wang Y., Dai L., Hu H. All-electric ship operations and management: Overview and future research directions. *ETransportation*. 2023. Vol. 17. Article ID 100251. <https://doi.org/10.1016/j.etrans.2023.100251>
6. Sharifzadeh M., Cooper N., Van't Noordende H., Shah N. Operational strategies and integrated design for producing green hydrogen from wind electricity. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2024. Vol. 64. P. 650–675. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.03.237>
7. Onsay E. A., Bulao R. J. G., Rabajante J. F. Bagyong Kristine (TS Trami) in Bicol, Philippines: Flood Risk Forecasting, Disaster Risk Preparedness Predictions and Lived Experiences through Machine Learning (ML), Econometrics, and Hermeneutic Analysis. *Natural Hazards Research*. 2025. <https://doi.org/10.1016/j.nhres.2025.02.004>
8. Mentis A. Risk analysis of on-field and on-board activities and resilience investigation of Izmir Aliaga Ship Recycling Facilities. *Ocean Engineering*. 2023. Vol. 287. Article ID 115891. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.115891>

9. Ruponen P., Montewka J., Tompuri M., Manderbacka T., Hirdaris S. A framework for onboard assessment and monitoring of flooding risk due to open watertight doors for passenger ships. *Reliability Engineering & System Safety*. 2022. Vol. 226. Article ID 108666. <https://doi.org/10.1016/j.res.2022.108666>
10. Sultana S., Haugen S. An extended FRAM method to check the adequacy of safety barriers and to assess the safety of a socio-technical system. *Safety Science*. 2022. Vol. 157. Article ID 105930. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2022.105930>
11. Moussa A. A., Farag Y. B., Gunbeyaz S. A., Fahim N. S., Kurt R. E. Development and research directions in ship recycling: A systematic literature review with bibliometric analysis. *Marine Pollution Bulletin*. 2024. Vol. 201. Article ID 116247. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2024.116247>
12. Hasan Imran M., Khan M. I., Jamaludin S., Hasan I., Bin Ahmad M. F., Mohamad Ayob A. F., Norsani bin Wan Nik W. M., Russtam Suhrab M. I., Ridwan Bin Zulkifli M. F., Afrizal N. B., Abidin Bin Syed Ahmad S. Z. A critical analysis of machine learning in ship, offshore, and oil & gas corrosion research, part I: Corrosion detection and classification. *Ocean Engineering*. 2024. Vol. 313. Article ID 119600. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.119600>
13. Han S., Li F., Lee C., Wang T., Diaconeasa M. A. Mirror the mind of crew: Maritime risk analysis with explicit cognitive processes in a human digital twin. *Advanced Engineering Informatics*. 2024. Vol. 62. Article ID 102746. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2024.102746>
14. Alsuwian T., Ansari S., Zainuri M. A. A. M., Ayob A., Abdolrasol M. G., Sudaryanto S., Alhawari A. R., Almajwani A., Almasabi S., Hindi A. T. A review of hybrid methods based remaining useful life prediction framework and SWOT analysis for energy storage systems in electric vehicle application. *Journal of Energy Storage*. 2025. Vol. 117. Article ID 116152. <https://doi.org/10.1016/j.est.2025.116152>
15. Melnyk O., Bychkovsky Y., Onishchenko O., Onyshchenko S., Volianska Y. Development the Method of Shipboard Operations Risk Assessment Quality Evaluation Based on Experts Review. *Studies in Systems, Decision and Control*. 2023. Vol. 481. P. 695–710. https://doi.org/10.1007/978-3-031-35088-7_4
16. Onyshchenko S., Bychkovsky Y., Melnyk O., Onishchenko O., Jurkovič M., Rubskyi V., Liashenko K. A model for assessing shipping safety within project-orientated risk management based on human element. *Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport*. 2024. Vol. 123. P. 319–334. <https://doi.org/10.20858/sjsutst.2024.123.16>
17. Melnyk O., Onyshchenko S., Shumylo O., Ocheretna V., Kononova O. Analysis of Factors Affecting the Ship Safety on the Basis of Six-Stage Risk Management Model. In: Babak V., Zaporozhets A. (eds) *Systems, Decision and Control in Energy VI. Studies in Systems, Decision and Control*. 2024. Vol. 561. P. 421–434. https://doi.org/10.1007/978-3-031-68372-5_23.

Received (Надійшла) 11.02.2025

Accepted for publication (Прийнята до друку) 24.04.2025

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

Мельник Олексій Миколайович – доктор технічних наук, професор, професор кафедри судноводіння і морської безпеки, Одеський національний морський університет, Одеса, Україна;

Oleksiy Melnyk – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor at the Department of Navigation and Maritime Safety, Odesa National Maritime University, Odesa, Ukraine;

e-mail: m.onmu@ukr.net; ORCID Author ID: <https://orcid.org/0000-0001-9228-8459>;

Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57216657937>

Никитюк Петро Володимирович – старший викладач, аспірант кафедри судноводіння і морської безпеки, Одеський національний морський університет, Одеса, Україна;

Petro Nykytuik – Senior Lecturer, postgraduate of Department of Navigation and Maritime Safety, Odesa National Maritime University, Odesa, Ukraine;

e-mail: gelaevnyk@gmail.com; ORCID Author ID: <https://orcid.org/0000-0002-5905-3807>;

Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=59680170900>.

Calculation model for assessing ship operational safety considering the degradation of barriers and risk forecasting

Petro Nykytuik, Oleksiy Melnyk

Abstract. Relevance. With the increasing complexity of the technical support of marine vessels and the introduction of autonomous control elements, there is a growing need to create models that can adaptively respond to changes in the technical condition of subsystems and external threats. A key element in safety systems is a generalized risk index, which should dynamically change depending on technical degradation and the combined impact of the environment. **Object of research:** an integrated model for assessing the operational safety of a ship. **Purpose:** to develop a method for calculating the operational safety of a ship, taking into account the degradation of safety barriers, the technical condition of subsystems and the forecast of risk dynamics. **Research results.** The article proposes a multilevel probabilistic model that allows calculating the risks of individual subsystems, evaluating the effectiveness of safety barriers, and forming an integrated safety index (SIRI). The model is supplemented with a block for predicting the time to a critical state and an algorithm for activating a protective response. Numerical modeling of six ship subsystems for eight typical operating scenarios was carried out. **Conclusions.** Implementation of the model allows for early detection of risky situations, reduction of response time, and increase of decision-making systems' information content. The model can be used as the core of digital platforms for managing the safety of ships. Scope of application of the results: intelligent ship safety management systems, autonomous navigation, automated navigation platforms.

Keywords: vessel operational safety; integrated risk model; barrier degradation; technical condition of subsystems; SIRI risk index; maritime safety management; digital forecasting; probabilistic model; safety margin assessment; response time forecast; multifactorial analysis; scenario modeling; critical states; automated response; decision support.