

СТВОРЕННЯ ІНТЕГРОВАНОЇ МОДЕЛІ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНОЇ БЕЗПЕКИ СУДНА

Никитюк П. В., старший викладач кафедри судноводіння і морської безпеки, Одеський національний морський університет, м. Одеса, Україна, e-mail: nikpv.onmu@ukr.net, ORCID: 0000-0002-5905-3807;

Мельник О. М., д.т.н., професор, професор кафедри судноводіння і морської безпеки, Одеський національний морський університет, м. Одеса, Україна, e-mail: m.onmu@ukr.net, ORCID: 0000-0001-9228-8459.

Стаття пропонує інтегровану математичну модель (ММ), застосування якої у практиці дозволяє підвищити експлуатаційну безпеку суден. Модель поєднує декілька критично важливих компонентів: імовірнісну оцінку ризиків, що надає кількісні показники потенційних загроз; глибинний аналіз деградації бар'єрів безпеки, відстежуючи зменшення захисних шарів з часом або під впливом навантажень; агреговану оцінку стану різних підсистем судна в режимі реального часу, уніфікуючи різномірні дані для цілісного огляду; надійні можливості прогнозування ризиків, засновані на використанні технологій нейронних мереж, що дозволяє передбачати майбутні траєкторії ризиків на основі вивчених закономірностей зі складних експлуатаційних даних.

Змодельовано серію з п'яти різних експлуатаційних сценаріїв. Ці сценарії розроблені так, щоб охопити широкий спектр умов функціонування судна, критично враховуючи динамічні зміни навколишнього середовища, різноманітні технічні збої (несправності, поломки) та потенційну втрату ефективності чинних систем безпеки та захисту. Тестування сценаріїв дозволило провести валідацію продуктивності моделі в різноманітних та складних експлуатаційних умовах.

Результати симуляції демонструють здатність запропонованої моделі виявляти небезпечні умови на надзвичайно ранніх стадіях їхнього розвитку, задовго до того, як вони переростуть у критичні інциденти. Показано, що модель здатна генерувати кількісні оцінки ризиків, пропонуючи чіткі числові дані про потенційні загрози, формує дієві рекомендації для превентивного реагування, надаючи особам, які приймають рішення, своєчасні та актуальні вказівки для запобігання несприятливим подіям. Вбудовані індикатори інтегрованого ризику, запасу міцності та безперервного моніторингу деградації бар'єрів безпеки підтверджують високу інформативність системи, щодо визначення статусу безпеки судна. Модель має адаптивність до високодинамічного морського середовища. Пропонований підхід може служити основою для створення складних функціональних платформ, присвячених комплексному управлінню безпекою морських суден. Пропонується інтеграція таких ММ у сучасні навігаційні та безпекові системи управління інформацією.

Ключові слова: морський транспорт; експлуатаційна безпека; інтегрована модель; бар'єри безпеки; оцінка ризиків; деградація; прогнозування; суднові системи; процес управління; комплекс; адаптація; системний моніторинг; процеси керування; підтримка рішень.

DOI: 10.33815/2313-4763.2025.1.30.209-221

Вступ. На поточному етапі інтенсивного розвитку морських перевезень, зростання складності суднових систем і підвищених вимог до безпеки виконання технічних та технологічних процесів на судах, проблеми забезпечення експлуатаційної безпеки судна виходять на перший план. Класичні підходи до оцінки морських ризиків часто не враховують комплексного впливу факторів середовища, технічного стану систем судна та людського елементу. Водночас розвиток інформаційних технологій і обчислювальної техніки дозволяє впроваджувати інтегровані підходи оцінювання, що поєднують аналітичні моделі, штучний інтелект, машинне навчання та багатофакторний аналіз для комплексного моніторингу й управління безпекою суднових операцій. Особливої актуальності набуває застосування таких моделей для автономних суден, що працюють у динамічному морському середовищі з мінімальним втручанням людини.

У цьому контексті інтегровані моделі оцінки та прогнозування експлуатаційних ризиків стають основою для підвищення рівня морської безпеки, оптимізації керування суднами, зниження ймовірності аварійних ситуацій і є вкрай актуальними.

Аналіз останніх досліджень та постановка проблеми. Останні дослідження у сфері експлуатаційної безпеки суден у більшості випадків орієнтовані на інтегровані підходи до

оцінки ризиків, аналізу бар'єрів безпеки та використанні сучасних інтелектуальних технологій. У [1, 11] запропоновано методики кількісної оцінки ефективності бар'єрів безпеки, орієнтовані на підвищення стійкості суднових систем, використовуючи ймовірнісні мережі для комплексного аналізу. Модель багатошарової оцінки безпеки судна, презентована у [2], демонструє важливість поєднання інформаційної та технічної безпеки в єдиній структурі. Інша робота [3] зосереджена на інтегрованому підході до кібербезпеки судового обладнання, як критичного чинника загальної експлуатаційної безпеки.

Стосовно портової логістики, у науковій праці [4] використано гібридні моделі DEMATEL-OPA-DGRA для ідентифікації та оптимізації затримок інформації.

У контексті автономних суден автори роботи [5, 15] розглядають моделі ризиків у складних умовах плавання з обмеженою видимістю та простором маневрування, запропонувавши фреймворк оцінки операційного ризику, розглядають проблеми логістики при використанні таких засобів. Публікація [6] надає огляд методів контролю в контексті безпеки та кіберзахисту, що має високу релевантність у рамках використання інтегрованих моделей. Водночас у [7–9] інтегрують Deep Q-мережі та знання експертів для оптимізації операційної ефективності в портах. Деякі дослідження, наприклад, [10–12] зосереджуються на кількісному аналізі бар'єрів безпеки у промисловому середовищі, що адаптивно переноситься у сферу морського транспорту.

Особливу цінність становлять методики реального часу, які детально представлені у [13] і пропонують використати гібридну модель глибокого навчання для прогнозу наслідків зіткнень у реальних умовах. Робота [14] звертає увагу на специфіку управління ризиками для малих риболовецьких суден.

Постановка проблеми. Попри значний науковий прогрес, практична інтеграція моделей оцінки ризиків, контролю ефективності бар'єрів, інформаційної безпеки та ситуаційної обізнаності в єдину операційну систему забезпечення безпеки судна, залишається недостатньо реалізованою. Чинні підходи часто мають одновимірний характер або орієнтовані на окремі аспекти, тоді як реальні судові системи функціонують у багатофакторному, динамічно змінюваному середовищі. Відсутність інтегрованих платформ, здатних до адаптивного управління ризиками в реальному часі, суттєво знижує ефективність рішень і підвищує ймовірність помилок оператора. Також, недостатньо досліджена взаємодія між фізичними та цифровими бар'єрами безпеки в умовах інцидентів або кіберзагроз.

Метою дослідження є розробка та верифікація інтегрованої моделі забезпечення експлуатаційної безпеки судна, яка поєднує відомі методи оцінки ризиків, ефективності бар'єрів безпеки, інформаційної захищеності та оперативного реагування в умовах змінного морського середовища.

Завдання дослідження: а) провести аналіз сучасних моделей управління експлуатаційною безпекою суден та їхніх обмежень; б) сформулювати інтегровану концептуальну модель оцінки та управління ризиками з урахуванням фізичних і інтелектуальних бар'єрів; в) реалізувати обчислювальну модель для тестування поведінки системи за різних сценаріїв (технічна відмова, зіткнення, кіберінцидент); г) проаналізувати ефективність запропонованої моделі за критеріями стійкості, своєчасності реакції та зниження ризику.

Наукова новизна дослідження полягає у наступному.

По-перше, запропоновано єдину інтегровану модель забезпечення експлуатаційної безпеки судна, яка одночасно враховує вплив фізичних, інформаційних та когнітивних бар'єрів у режимі реального часу на основі багаторівневої оцінки ризиків. На відміну від наявних підходів, запропонована модель орієнтована не лише на оцінку ймовірності окремих подій, а й на динамічне оновлення сценаріїв ризику із застосуванням гібридного обчислювального ядра, що поєднує ймовірнісні структури з модулями глибокого навчання для прогнозування критичних станів системи. Уведено концепцію бар'єрів безпеки, як окремого функціонального елементу інтегрованої архітектури управління ризиками судна, реалізовану на основі моделі повного перекриття.

Отримало подальший розвиток використання методів ситуаційної обізнаності з розширенням їх функціоналу до методів обізнаності з адаптацією їх функціоналу до умов рейсу та адаптивним реагуванням на зміни зовнішніх умов та внутрішнього технічного стану судна, а також здатність ефективно управляти багатофакторними загрозами, від технічних відмов до кіберінцидентів. Практичне застосування моделі забезпечує підвищення точності операційного ризику, скорочення часу реагування систем безпеки судна та ймовірності виникнення аварійних ситуацій.

Виклад основного матеріалу. Безумовно, для забезпечення цілісної експлуатаційної безпеки судна необхідна така модель, яка здатна охопити динаміку морського середовища, технічний стан судових систем, вплив людського фактора та ефективність наявних бар'єрів безпеки. Пропонується інтегрована модель, яка поєднує методи ймовірнісного аналізу, функції ефективності бар'єрів, прогнозу компоненту та зважену оцінку критичності підсистем судна. Використання такої моделі дозволить створити адаптивну систему, що реагує на ризики в режимі реального часу та підтримує оператора у прийнятті ним найбільш ефективних рішень.

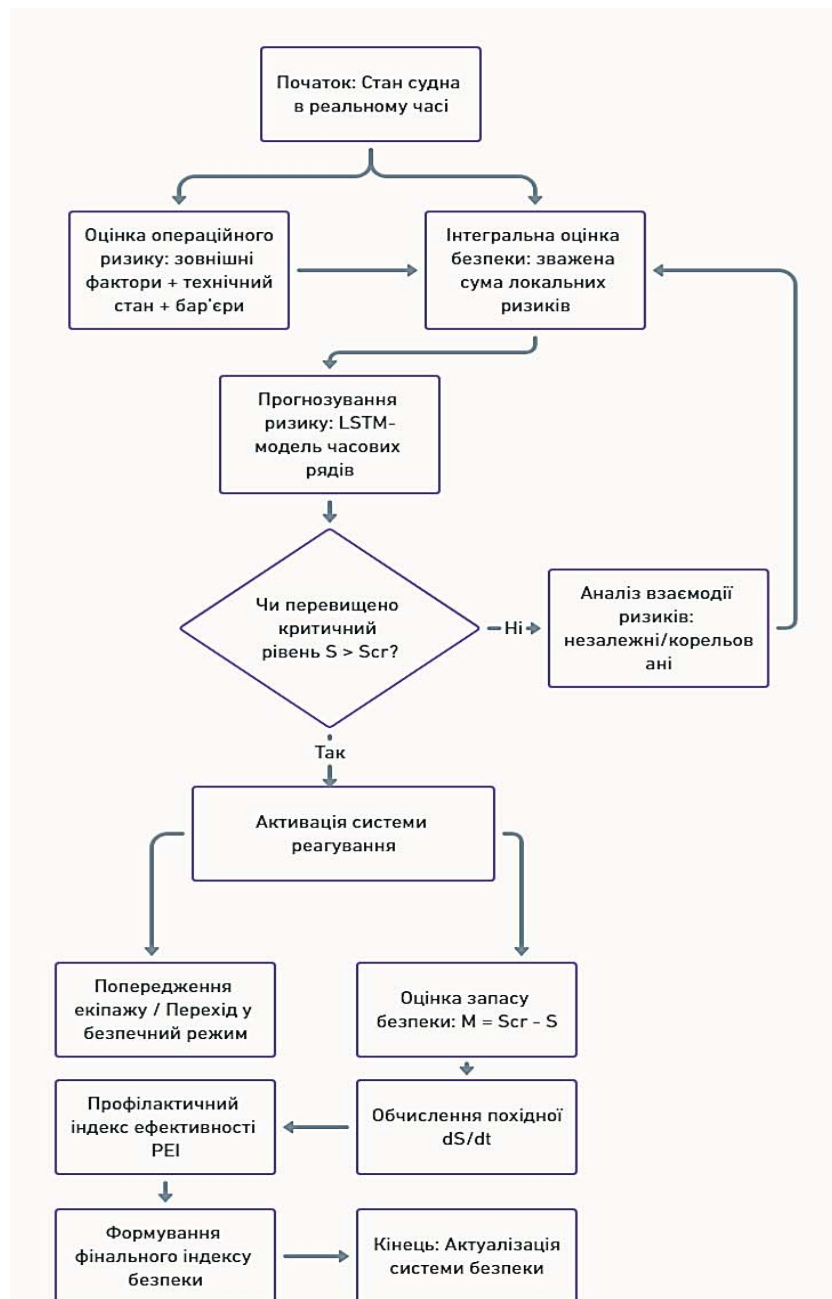


Рисунок 1 – Алгоритм динамічного управління експлуатаційною безпекою судна

Для інтерпретації логіки функціонування інтегрованої системи забезпечення експлуатаційної безпеки судна пропонується функціональний алгоритм, представлений на рис. 1, де відображена послідовність ключових етапів: від збору та оцінки поточних даних про стан судна до прогнозування критичних ситуацій, прийняття рішень і формування підсумкових індикаторів безпеки.

Алгоритм динамічного управління експлуатаційною безпекою судна реалізує циклічну оцінку, прогнозування та реагування на основі реального стану судна. Початково виконується оцінка операційного ризику (зовнішні фактори, технічний стан, бар'єри), після чого формується інтегральна оцінка безпеки, з урахуванням локальних ризиків підсистем.

Далі, за допомогою *LSTM*-моделі, здійснюється прогнозування ризику на наступні часові інтервали. Якщо розрахований рівень безпеки S перевищує граничне значення S_{cr} , активується система реагування: попередження екіпажу, перехід у безпечний режим, розрахунок запасу безпеки $M = S_{cr} - S$ та швидкості зміни ризику dS/dt . Паралельно виконується аналіз корельованих ризиків. На завершальному етапі формується профілактичний індекс ефективності (*PEI*) та фінальний індекс безпеки з подальшою актуалізацією параметрів системи.

Далі спрощено наведені основні елементи інтегрованої моделі, яка поєднує три основні компоненти (оцінку операційного ризику, модель ефективності бар'єрів безпеки та механізм адаптивного реагування). Таким чином, необхідно сформувати систему, що забезпечує реальний контроль за станом судна, його системами і навколишнім середовищем у контексті запобігання інцидентам.

1. Оцінка операційного ризику. Загальна ймовірність аварійної події $P(R)$ визначається як комбінація умовних ймовірностей кількох ключових факторів: зовнішнього середовища F_i , технічного стану системи C_i та функціонування бар'єрів безпеки B_i :

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

Цей вираз дозволяє моделювати складну ймовірнісну залежність між подіями, що можуть спричинити аварійну ситуацію.

2. Модель ефективності бар'єрів. Оскільки технічні системи безпеки деградують із часом, їхня ефективність $E_B(t)$ моделюється як експоненційна функція:

$$E_B(t) = E_0 \cdot e^{-\lambda t}, \quad (2)$$

де E_0 – початковий рівень ефективності (100 % при введенні в експлуатацію), λ – коефіцієнт деградації, залежить від типу обладнання, середовища та режиму роботи, t – час експлуатації.

Такий вираз дозволяє динамічно враховувати зниження здатності бар'єра стримувати або компенсувати ризик. Наприклад, узагальнено, одним з етапів оцінки наслідків аварії, може бути зважена сума компонент:

$$C = \alpha L + \beta E + \gamma F + \delta R, \quad (3)$$

де L – людські втрати, E – екологічні, F – фінансові, R – репутаційні втрати; $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ – відповідні вагові коефіцієнти (експертні, апріорні/прогнозовані тощо).

3. Інтегральна оцінка стану судна. Для формування узагальненої оцінки безпеки всі ризики підсистем зважуються відповідно до їх критичності. Рівень безпеки судна S визначається як:

$$S = f \left(\sum_{j=1}^m w_j \cdot R_j \cdot (1 - E_{Bj}) \right), \quad (4)$$

де w_j – ваговий коефіцієнт підсистеми j , R_j – локальна оцінка ризику для підсистеми, E_{Bj} – ефективність відповідного бар'єру. Функція $f(\cdot)$ може бути як лінійною, так і логістичною, залежно від системи керування.

4. Прогноз ризику з використанням *LSTM*. Ключовим компонентом моделі є здатність до прогнозування. З цією метою використовується рекурентна (нейромережева) структура (*LSTM*), яка аналізує часові ряди параметрів, тож для прогнозування майбутніх значень ризику застосуємо *LSTM*-модель, що працює з часовими рядами:

$$\hat{R}_{t+1} = \text{LSTM}(F_{1:t}, C_{1:t}, B_{1:t}) . \quad (5)$$

Така модель враховує залежності між подіями в часі й дозволяє здійснювати керування на випередження.

5. Умова активації системи реагування. Коли загальний рівень ризику перевищує критичне значення S_{cr} , система ініціює аварійне втручання або перехід у безпечний режим:

$$S > S_{cr} \rightarrow \{\text{Активация аварийного алгоритма}\} . \quad (6)$$

Наприклад, це може включати зупинку судна, сповіщення екіпажу або автоматичне перемикання систем керування рухом. Отримане прогнозне значення використовується для оцінки ймовірності аварії у найближчому майбутньому та проактивного реагування.

Для більш компактного й прикладного використання впроваджується інтегрований індекс ризику судна:

$$SIRI = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m (w_j \cdot R_j \cdot (1 - E_{B_j})) . \quad (7)$$

Його перевищення порогового значення супроводжується запуском аварійного протоколу. Очевидно, що швидкість зміни ризику легко оцінюється через відомий вираз для похідної:

$$\frac{dR}{dt} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{R(t + \Delta t) - R(t)}{\Delta t} . \quad (8)$$

Комбінована логіка прийняття рішення задається як функція кількох умов:

$$\text{IF } SIRI > S_{cr} \quad \text{AND} \quad \frac{dR}{dt} > \gamma \Rightarrow \text{RESPONSE} . \quad (9)$$

де γ – граничний градієнт ризику. У підсумку, можна обчислити очікувану втрату безпеки:

$$L = \sum_{j=1}^m p_j \cdot \Delta S_j \quad (10)$$

та сформувати фінальний узагальнений показник:

$$S_{\text{total}} = \phi \left(\bar{R}, \bar{E}_B, t, \frac{dR}{dt}, L \right) . \quad (11)$$

Таким чином, запропонований алгоритм охоплює не лише оцінку стану судна «тут і зараз», а й дозволяє здійснювати прогнозування та адаптацію, формуючи цілісну цифрову структуру управління безпекою.

6. Функція адаптації вагових коефіцієнтів підсистем. У разі зміни умов (наприклад, аварійного режиму), ваги підсистем можуть автоматично оновлюватися згідно з функцією пріоритетності:

$$w_j(t) = \frac{\alpha_j \cdot S_j^{-1}}{\sum_{k=1}^m \alpha_k \cdot S_k^{-1}} , \quad (12)$$

де α_j – базова важливість підсистеми j , S_j – поточний рівень безпеки цієї підсистеми, $w_j(t)$ – динамічна вага, нормована в реальному часі. Це дозволяє автоматично зміщувати фокус системи до найбільш уразливих зон.

7. Оцінка запасу безпеки (Safety Margin). Запас безпеки визначається як різниця між критичним та фактичним індексом:

$$M = S_{cr} - SIRI, \quad (13)$$

де $M \rightarrow 0$ – означає наближення до критичного рівня ризику, і вимагає пріоритетної реакції.

8. Інтегрована ймовірність виявлення інциденту. Якщо використовується кілька датчиків або систем моніторингу, ймовірність виявлення інциденту можна описати як:

$$P_d = 1 - \prod_{k=1}^n (1 - p_k), \quad (14)$$

де p_k – ймовірність виявлення події кожним із n незалежних сенсорів або систем. Це дозволяє враховувати, так званий, мультисенсорний контроль або дублювання систем.

9. Коефіцієнт стійкості системи до потрясінь (Resilience Index). Для оцінки здатності системи відновлюватися після критичних подій вводимо:

$$RI = \frac{T_{rec}}{T_{dis} + T_{rec}}, \quad (15)$$

де T_{dis} – тривалість впливу інциденту, T_{rec} – час, за який система повертається до безпечного стану. Встановлено: $RI \rightarrow 1$ – висока стійкість системи, $RI \rightarrow 0$ – критична вразливість системи.

10. Функція оцінки ймовірності каскадного збою (cascading failure). Ймовірність переходу локального збою в системний виглядає як:

$$P_{cas} = 1 - \prod_{i=1}^m (1 - q_i \cdot (1 - E_{Bi})) , \quad (16)$$

де q_i – ймовірність, що збій у підсистемі i спричинить ланцюгову реакцію, E_{Bi} – здатність бар'єра стримати поширення збоїв.

Це критичний показник для оцінки «ефекту доміно» у складних судових системах.

11. Інтегральна функція часового накопичення ризику (Cumulative Risk Exposure). Враховуючи, що ризик може бути не критичним у певний момент, але загрожує при накопиченні, вводимо:

$$CRE(t) = \int_0^t R(\tau) \cdot d\tau . \quad (17)$$

За допомогою (17) дозволяється оцінка загального навантаження на систему безпеки за проміжок часу $[0, t]$.

12. Ймовірність множинного ризику (Multi-risk interaction function). Якщо два або більше незалежних ризики діють одночасно, тоді:

$$P(R_1 \cap R_2 \cap \dots \cap R_n) = \prod_{i=1}^n P(R_i), \quad (18)$$

а якщо ризики корельовані, то з урахуванням коефіцієнтів взаємозв'язку ρ_{ij} :

$$P_{corr} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \rho_{ij} \cdot P(R_i) \cdot P(R_j) . \quad (19)$$

Це критично для складних сценаріїв (наприклад, технічний збій, плюс людська помилка, плюс складне довкілля).

13. Функція ефективності системи запобігання (Prevention Effectiveness Index). Оцінка того, наскільки система безпеки реально знижує потенційний ризик:

$$PEI = 1 - \frac{P(R|B)}{P(R|\neg B)}, \quad (20)$$

де $P(R|B)$ – ймовірність аварії при наявності бар'єра, $P(R|\neg B)$ – без бар'єра. Чим ближче PEI до 1, тим ефективніше система безпеки.

14. Інтервал часу до критичного стану (Time-to-Failure Estimate). При відомому градієнті ризику можна наближено обчислити залишковий час до досягнення граничного рівня:

$$T_{crit} = \frac{S_{cr} - S(t)}{\frac{dS}{dt}}. \quad (21)$$

Це дозволяє запускати попередження не за фактом, а проактивно.

15. Структурна стійкість системи безпеки (Redundancy Coverage Index). Якщо система має резервні модулі, то:

$$RCI = \frac{N_{act} + N_{back} \cdot \eta}{N_{total}}, \quad (22)$$

де η – коефіцієнт надійності резерву (0.8–1.0), N_{act} – активні модулі, N_{back} – резерви. Це дозволяє враховувати структурну надмірність, а не тільки функціональну ефективність.

Використання запропонованого алгоритму дозволяє не лише здійснювати моментну оцінку експлуатаційної безпеки судна з урахуванням фізичних, технічних і інформаційних чинників, але й прогнозувати динаміку ризику. Комбінація ймовірнісного моделювання, функцій деградації, вагового аналізу підсистем і методів прогнозування формує цілісну платформу для прийняття рішень у реальному часі. Важливо підкреслити, що модель здатна враховувати множинні сценарії, адаптуватися до змін середовища й технічного стану, а також формувати конкретні рекомендації для запобігання аваріям. Такий підхід створює надійне підґрунтя для цифрового управління безпекою в морській навігації та закладає основу для побудови автоматизованих систем підтримки судноводія в критичних умовах.

Методика моделювання. Метою, на етапі моделювання, є числова реалізація та подальша верифікація інтегрованої моделі забезпечення експлуатаційної безпеки судна в умовах змінного середовища, технічної невизначеності та деградації бар'єрів безпеки. Безумовна, реальна верифікація можлива лише в особливих умовах. Саме тому методика базується на поетапному використанні математичних виразів моделі, таблиць сценаріїв, вхідних технічних даних систем судна та програмній реалізації симуляцій.

Для модельного дослідження обрано чотири ключові підсистеми судна: система керування, енергетична установка, навігаційна система та комунікаційний модуль (зв'язок). Для кожної підсистеми визначено базову ймовірність відмови, початкову ефективність бар'єра, коефіцієнт деградації, а також вагові коефіцієнти критичності. Дані наведено у табл. 1. Сценарії моделювання охоплюють як нормальну експлуатацію, так і ускладнені умови – з комбінованим впливом середовища та технічних відмов.

Таблиця 1 – Алгоритм моделювання

Крок моделювання	Вхідні дані	Вихідні дані
1. Ініціалізація вхідних параметрів	$P(F), P(C), P(B), t$ з таблиці сценаріїв	Початкові значення для сценарію
2. Обчислення ймовірності аварії $P(R)$	$P(R)$	$F, C, B, P(F), P(C), P(B)$ – формула (1)
3. Розрахунок деградації ефективності $E_B(t)$	E_0, λ, t – експоненційна модель	$E_B(t)$ для кожного бар'єра
4. Оцінка стану S і індексу $SIRI$	R_j, w_j, E_{Bj} – з моделі	Індивідуальні S_j , інтегральний $SIRI$
5. Розрахунок запасу M , часу T_{crit}	$SIRI, S_{cr}, dR/dt$	Час до досягнення критичного рівня
6. Прогнозування $LSTM$	Часові ряди F, C, B	Прогнозоване $R^{\wedge}_{t+1}$
7. Генерація рішень	Всі попередні результати	Рекомендації: резерв, тривога, контроль

Процес моделювання реалізується як послідовність семи кроків, описаних у таблиці 1. На першому етапі відбувається ініціалізація вхідних параметрів на основі заданого сценарію. Далі розраховується ймовірність аварії згідно з умовною ймовірнісною формулою. Третій крок це моделювання експоненційної деградації ефективності бар'єрів. На основі отриманих значень формується оцінка безпеки окремих підсистем, а також агрегований індекс інтегрованого ризику судна (*SIRI*). Наступні етапи включають оцінку запасу безпеки та прогноз залишкового часу до критичного стану. Шостий крок, прогнозування майбутнього ризику із застосуванням моделі *LSTM*. На завершальному етапі система генерує рекомендації для переходу в безпечний режим або активації резервного контролю.

Запропонована методика забезпечує реалізацію математичної структури інтегрованої моделі безпеки у вигляді поетапного алгоритму, здатного адаптуватися до конкретних умов експлуатації судна.

Чітке розмежування вхідних параметрів, аналітичних розрахунків та вихідних індикаторів дозволяє ефективно аналізувати складні сценарії розвитку подій, включно з деградацією технічних елементів, дією множинних ризиків та реакцією захисних систем. Гнучкість реалізації в цифровому середовищі дає змогу легко масштабувати модель, інтегрувати її у корабельні інформаційні системи, а також проводити навчальні симуляції для екіпажу. Результати, отримані за цією методикою, дозволяють не лише кількісно оцінити рівень безпеки, але й здійснювати своєчасне прогнозування критичних станів та ініціювати запобіжні дії.

У наступному розділі статті наведено деякі приклади застосування методики до реалістичних сценаріїв, що дозволяє верифікувати модель та проаналізувати її ефективність.

Результати та обговорення. На основі запропонованого алгоритму та описаної методики проведено моделювання для п'яти типових сценаріїв експлуатації судна, що охоплюють як штатні умови, так і аварійні ситуації з деградацією технічних елементів. Для кожного сценарію розраховано умовну ймовірність аварійної події $P(R)$, локальні оцінки ризику для чотирьох ключових підсистем (система керування рухом – $S_{кер}$, енергетична система судна – $S_{ен}$, навігаційна система – $S_{нав}$ та система зв'язку – $S_{зв}$), інтегрований індекс безпеки судна *SIRI*, а також запас безпеки $M = S_{cr} - SIRI$, де $S_{cr} = 0,05$ є граничним значенням, за яким ініціюється аварійна реакція.

Таблиця 2 – Результати моделювання показників безпеки судна за експлуатаційними сценаріями

Сценарій	$P(R)$	$S_{кер}$	$S_{ен}$	$S_{нав}$	$S_{зв}$	<i>SIRI</i>	<i>M</i>
Базовий	0.0058	0.0002	0.0002	0.0003	0.0003	0.0011	0.0489
Погіршення погоди	0.0134	0.0006	0.0006	0.0007	0.0007	0.0025	0.0475
Втрата бар'єра	0.0058	0.0007	0.0006	0.0006	0.0005	0.0023	0.0477
Комбінований вплив	0.0153	0.0024	0.0019	0.0018	0.0015	0.0076	0.0424
Критичне навантаження	0.0192	0.0035	0.0027	0.0026	0.0020	0.0109	0.0391

У базовому сценарії ймовірність інциденту становить лише 0,58 %, а інтегральна оцінка безпеки $SIRI = 0,0011$, що значно нижче критичного рівня. Однак уже при погіршенні погодних умов показник зростає більш ніж удвічі, а при втраті резервного бар'єра попри відносно стабільний рівень $P(R)$ – збільшується вплив деградації бар'єра, що відображено у вищих значеннях локальних ризиків.

Найбільш небезпечним виявився сценарій критичного навантаження, де одночасна дія зовнішнього середовища та внутрішніх відмов призводить до зростання *SIRI* до 0,0109, майже 22 % від порогового значення. Запас безпеки у цьому випадку становить лише 0,0391, що свідчить про наближення до аварійної зони, при цьому найуразливішими залишаються системи керування й енергетики.

Таким чином, попередні результати підтверджують здатність моделі реагувати на зміну умов, визначати розрахунки ризику залежно від технічних і середовищних факторів, а також надавати кількісну основу для запуску автоматичних або ручних механізмів реагування.

Графік, наведений на рис. 2, показує, як інтегрований індекс ризику (*SIRI*) зростає зі зміною сценаріїв – найвищі значення спостерігаються у критичних режимах.

Цей графік демонструє зростання індексу *SIRI* залежно від складності сценарію. Найнижчі значення відповідають базовим умовам, тоді як у комбінованому та критичному сценаріях індекс значно підвищується. Це свідчить про наближення до межі безпеки, за якою система має активувати аварійне реагування.

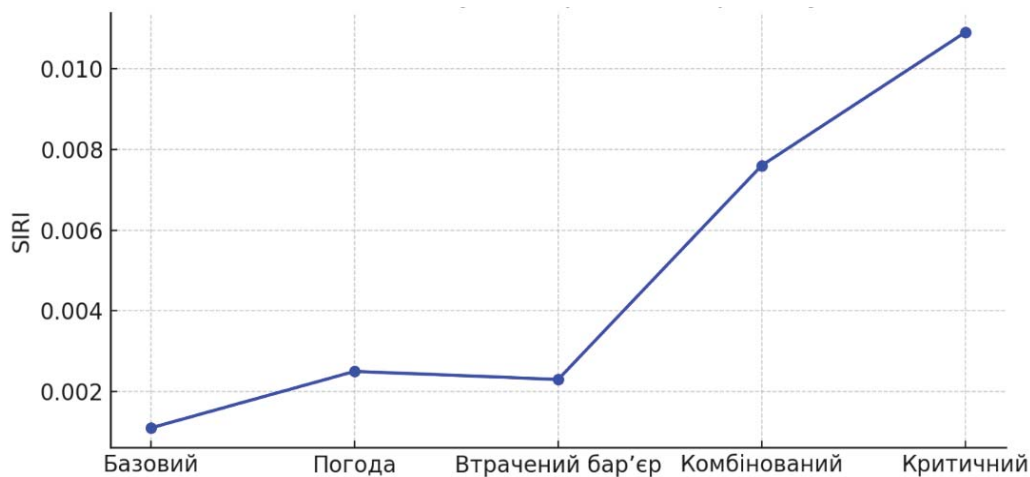


Рисунок 2 – Динаміка індексу інтегрованого ризику (*SIRI*)

Графік запасу безпеки (*M*) представлений на рис. 3, демонструє зменшення стійкості системи – чим нижче значення, тим ближче до активації аварійного реагування.

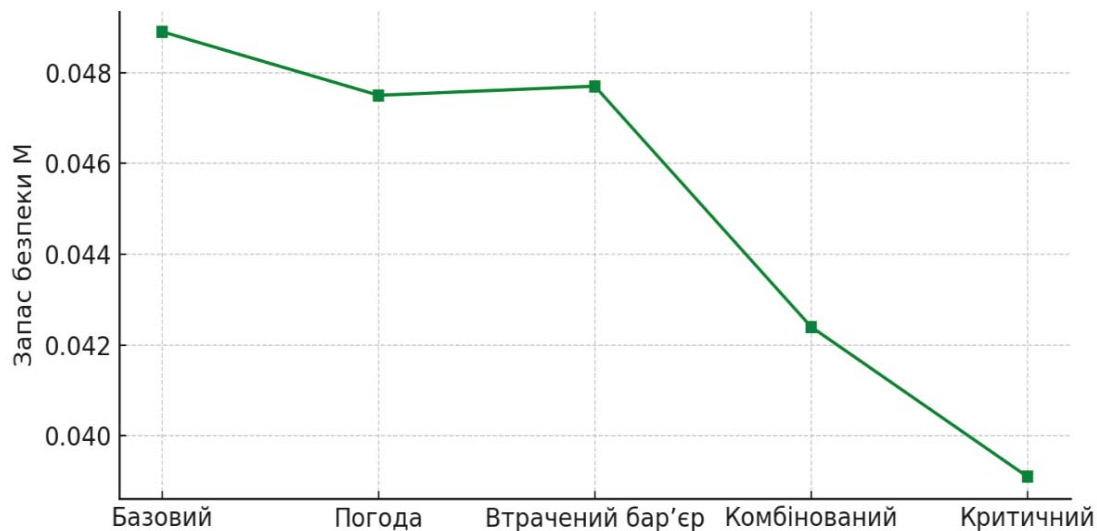


Рисунок 3 – Запас безпеки (*M*) у різних сценаріях

На графіку чітко видно, як з ускладненням умов експлуатації зменшується запас безпеки. У критичних умовах запас знижується до значення менш як 0,04, що свідчить про необхідність попереджувальних дій для уникнення системної відмови або інциденту.

Порівняльний графік підсистем (рис. 4) ілюструє, що найбільший ризик у критичних умовах припадає на системи керування та енергетичного забезпечення.

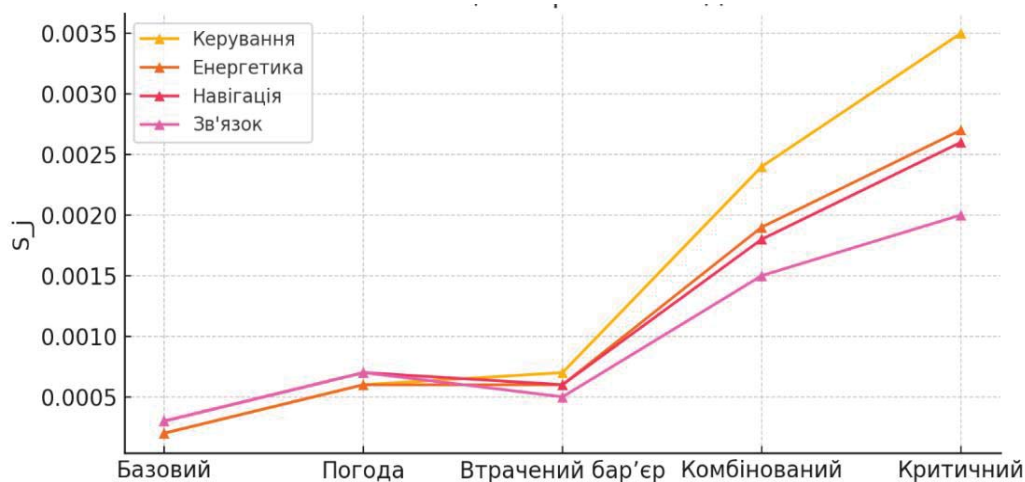


Рисунок 4 – Локальні оцінки ризиків підсистем

Приведений графік порівнює, як різні підсистеми реагують на зміну сценаріїв. У критичних випадках найбільш вразливими виявляються системи керування й енергетики, які мають вищі локальні ризики S_j . Це дає змогу точково спрямовувати зусилля на зміцнення саме тих компонентів, які є ключовими в конкретному контексті.

На рис. 5 продемонстровано, що зменшення ефективності бар'єрів залежно від тривалості експлуатації, є експоненційним.

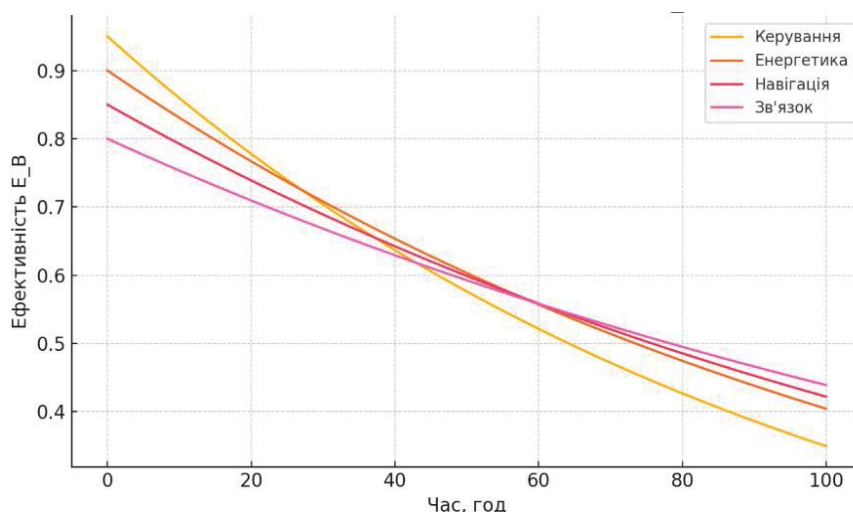


Рисунок 5 – Деградація ефективності бар'єрів $E_B(t)$

Як видно з графіка, найшвидше деградує бар'єр системи керування (у наведеному прикладі вже через 100 годин його ефективність знижується до приблизно 37 %). Найбільш стійким виявляється бар'єр у системі зв'язку, що повільно втрачає здатність протидіяти ризикам, що дозволяє завчасно планувати технічне обслуговування, заміну елементів безпеки, оновлення програмного забезпечення, інших засобів, що зазнають зносу.

Висновки. У ході дослідження розроблено та протестовано інтегровану модель забезпечення експлуатаційної безпеки судна, яка враховує комбінацію технічних, інформаційних і середовищних чинників. Пропонований математичний апарат моделі базується на поєднанні ймовірнісного аналізу, функцій деградації бар'єрів безпеки, агрегованої оцінки стану підсистем і прогнозного модуля на основі нейромережі LSTM. Результати моделювання підтверджують, що навіть за незначного збільшення ймовірності відмови або втрати ефективності бар'єра загальний індекс ризику судна ($SIRI$) може швидко досягати рівнів, які вимагають втручання.

Під час симуляцій типових сценаріїв виявлено, що найбільше навантаження припадає на підсистеми керування та енергетичні системи, особливо в умовах комбінованого або критичного впливу. Залежності ризику, запасу безпеки та ефективності бар'єрів

продемонстрували високу чутливість системи до тривалості експлуатації та впливу динаміки зовнішнього середовища. Розроблена модель дозволяє здійснювати як оперативний аналіз, так і превентивне прогнозування небезпечних станів, що підвищує рівень ситуаційної обізнаності екіпажу або автономного контролера.

Слід вважати, що запропонована модель є ефективним інструментом інтегрованого управління безпекою суден і може бути адаптована до реальних умов експлуатації суден різного типу. Подальші дослідження повинні включати розширення кількості підсистем, інтеграцію з сенсорами у режимі реального часу та навчання моделі на основі історичних інцидентів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Deng W., Ma X. & Qiao W. Resilience-oriented safety barrier performance assessment in maritime operational risk management. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 139, 104581. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2024.104581>.
2. Melnyk O., Onishchenko O., Drozhzhyn O., Pasternak O., Vilshanyuk M., Zayats S. & Shcheniavskiy G. The ship safety evaluation and analysis on the multilayer model case study. *E3S Web of Conferences*, 501, 01018. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202450101018>.
3. Melnyk O., Onyshchenko S., Koskina Y., Aleksandrovska N., Drozhzhyn O., Maluha E., Pulyaev I., & Bondaryuk M. Full overlap ship security model: An integrative approach to shipboard equipment information security. *E3S Web of Conferences*, 501, 02002. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202450102002>.
4. Karimi N., Javanmardi E., Nadaffard A. & Facchini F. Systematic analysis and optimization of operational delay factors in port supply chains using a hybrid DEMATEL-OPA-DGRA approach. *Ocean & Coastal Management*, 263, 107620. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2025.107620>.
5. 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*, 248, 110176. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2024.110176>.
6. Wang Y., Kadakia Y., Wu Z. & Christofides P. D. An overview of control methods for process operational safety and cybersecurity. *Methods in Chemical Process Safety*, 8, 1–50. <https://doi.org/10.1016/bs.mcps.2024.07.006>.
7. Naserbegi A., Aghaie M., Sadeghi K., Ghazaie S., & Sokolova E. Improving operational flexibility of the integrated pressurized water reactor with the MED-TVC desalination system by control logic systems in the off-design mode. *Nuclear Engineering and Design*, 430, 113702. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2024.113702>.
8. Kang G., Im J. & Lee C. Operational strategy to minimize operating cost in LNG terminal using a comprehensive numerical boil-off gas model. *Energy*, 296, 130878. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.130878>.
9. Guo W., Zhang X., Ge Y. & Du Y. Deep Q-network and knowledge jointly-driven ship operational efficiency optimization in a seaport. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 197, 104046. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2025.104046>.
10. Mochizuki H. Summary of researches on operational characteristics and safety of molten salt fast reactors based on neutronics and thermal-hydraulics coupling analysis. *Nuclear Engineering and Design*, 435, 113941. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2025.113941>.
11. 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*, 243, 109884. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2023.109884>.
12. Hellas M. S., Chaib R., Nettour D. & Zerrouki H. A new approach proposal for ensuring security engineering through barrier and operational quantitative risk analysis (BOQRA). *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 91, 105390. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2024.105390>.

13. Zhang M., Wang H., Conti F., Manderbacka T., Remes H. & Hirdaris S. A hybrid deep learning method for the real-time prediction of collision damage consequences in operational conditions. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 145, 110158. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2025.110158>.

14. Obeng F., Domeh D., Khan F., Bose N. & Sanli E. An operational risk management approach for small fishing vessel. *Reliability Engineering & System Safety*, 247, 110104. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2024.110104>.

15. Onishchenko O. A., Melnyk O. M., Kurdiuk S. V., Drozdenko O. I., Havryliuk T. K. & Burlachenko D. A. Zastosuvannia metodiv mashynnoho navchannia dlia optymizatsii marshrutiv i zavdan avtonomnykh nadvodnykh aparativ [Application of machine learning methods for optimizing routes and tasks of autonomous surface vehicles]. *Nauka i tekhnika*, 12(40), 1372–1386. [https://doi.org/10.52058/2786-6025-2024-12\(40\)-1372-1386](https://doi.org/10.52058/2786-6025-2024-12(40)-1372-1386).

REFERENCES

1. Deng, W., Ma, X., & Qiao, W. (2025). Resilience-oriented safety barrier performance assessment in maritime operational risk management. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 139, 104581. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2024.104581>.

2. Melnyk, O., Onishchenko, O., Drozhzhyn, O., Pasternak, O., Vilshanyuk, M., Zayats, S., & Shcheniavskiy, G. (2024). The ship safety evaluation and analysis on the multilayer model case study. *E3S Web of Conferences*, 501, 01018. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202450101018>.

3. Melnyk, O., Onyshchenko, S., Koskina, Y., Aleksandrovska, N., Drozhzhyn, O., Maluha, E., Pulyaev, I., & Bondaryuk, M. (2024). Full overlap ship security model: An integrative approach to shipboard equipment information security. *E3S Web of Conferences*, 501, 02002. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202450102002>.

4. Karimi, N., Javanmardi, E., Nadaffard, A., & Facchini, F. (2025). Systematic analysis and optimization of operational delay factors in port supply chains using a hybrid DEMATEL-OPA-DGRA approach. *Ocean & Coastal Management*, 263, 107620. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2025.107620>.

5. Fan, C., Montewka, J., Bolbot, V., Zhang, Y., Qiu, Y., & Hu, S. (2024). Towards an analysis framework for operational risk coupling mode: A case from MASS navigating in restricted waters. *Reliability Engineering & System Safety*, 248, 110176. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2024.110176>.

6. Wang, Y., Kadakia, Y., Wu, Z., & Christofides, P. D. (2023). An overview of control methods for process operational safety and cybersecurity. *Methods in Chemical Process Safety*, 8, 1–50. <https://doi.org/10.1016/bs.mcps.2024.07.006>.

7. Naserbegi, A., Aghaie, M., Sadeghi, K., Ghazaie, S., & Sokolova, E. (2024). Improving operational flexibility of the integrated pressurized water reactor with the MED-TVC desalination system by control logic systems in the off-design mode. *Nuclear Engineering and Design*, 430, 113702. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2024.113702>.

8. Kang, G., Im, J., & Lee, C. (2024). Operational strategy to minimize operating cost in LNG terminal using a comprehensive numerical boil-off gas model. *Energy*, 296, 130878. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.130878>.

9. Guo, W., Zhang, X., Ge, Y., & Du, Y. (2025). Deep Q-network and knowledge jointly-driven ship operational efficiency optimization in a seaport. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 197, 104046. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2025.104046>.

10. Mochizuki, H. (2025). Summary of researches on operational characteristics and safety of molten salt fast reactors based on neutronics and thermal-hydraulics coupling analysis. *Nuclear Engineering and Design*, 435, 113941. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2025.113941>.

11. Deng, W., Ma, X., & Qiao, W. (2024). A novel methodology to quantify the impact of safety barriers on maritime operational risk based on a probabilistic network. *Reliability Engineering & System Safety*, 243, 109884. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2023.109884>.

12. Hellas, M. S., Chaib, R., Nettour, D., & Zerrouki, H. (2024). A new approach proposal for ensuring security engineering through barrier and operational quantitative risk analysis (BOQRA). *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 91, 105390. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2024.105390>.
13. Zhang, M., Wang, H., Conti, F., Manderbacka, T., Remes, H., & Hirdaris, S. (2025). A hybrid deep learning method for the real-time prediction of collision damage consequences in operational conditions. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 145, 110158. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2025.110158>.
14. Obeng, F., Domeh, D., Khan, F., Bose, N., & Sanli, E. (2024). An operational risk management approach for small fishing vessel. *Reliability Engineering & System Safety*, 247, 110104. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2024.110104>.
15. Onishchenko, O. A., Melnyk, O. M., Kurdiuk, S. V., Drozdenko, O. I., Havryliuk, T. K., & Burlachenko, D. A. (2024). Zastosuvannia metodiv mashynnoho navchannia dlia optymizatsii marshrutiv i zavdan avtonomnykh nadvodnykh aparativ [Application of machine learning methods for optimizing routes and tasks of autonomous surface vehicles]. *Nauka i tekhnika*, 12(40), 1372–1386. [https://doi.org/10.52058/2786-6025-2024-12\(40\)-1372-1386](https://doi.org/10.52058/2786-6025-2024-12(40)-1372-1386).

Nykytyuk P, Melnyk O. CREATION OF AN INTEGRATED MODEL FOR ENSURING OPERATIONAL SHIP SAFETY

The article proposes a novel integrated mathematical model meticulously designed to enhance the operational safety of ships. This comprehensive model seamlessly combines several critical components: probabilistic risk assessment, providing quantitative measures of potential hazards; an in-depth analysis of the degradation of safety barriers, tracking the erosion of protective layers over time or under stress; an aggregate evaluation of the real-time state of various ship subsystems, unifying heterogeneous data for a holistic view; and robust risk prediction capabilities grounded in advanced neural network technologies, enabling the forecasting of future risk trajectories based on learned patterns from complex operational data.

Building upon a robust modeling methodology, a series of five distinct operational scenarios were rigorously simulated. These scenarios were carefully crafted to encompass a wide spectrum of ship functioning conditions, critically considering dynamic environmental changes, various technical failures (e.g., machinery malfunctions, system breakdowns), and the potential loss of efficiency in existing security and safety systems. Such comprehensive scenario testing allows for a thorough validation of the model's performance across diverse and challenging operational contexts.

The simulation results unequivocally demonstrate the proposed model's exceptional ability to detect dangerous conditions at remarkably early stages of their development, far before they escalate into critical incidents. Furthermore, the model is capable of generating precise quantitative risk assessments, offering clear numerical insights into potential threats. Crucially, it also produces actionable recommendations for preventive response, empowering decision-makers with timely and relevant guidance to avert adverse events. The embedded indicators for integrated risk, safety margin, and continuous safety barrier degradation monitoring collectively confirm the system's high information content, providing a rich, multi-faceted understanding of the ship's safety status. This also highlights its remarkable adaptability within a highly dynamic maritime environment, where conditions can change rapidly and unpredictably. The innovative approach presented in this work can therefore serve as a foundational basis for the creation of sophisticated functional platforms dedicated to comprehensively managing the safety of marine vessels. Moreover, it offers significant potential for seamless integration into modern navigation and broader information management systems, thereby paving the way for more resilient, predictive, and proactively managed maritime operations in the future.

Key words: maritime transport; operational safety; integrated model; safety barriers; risk assessment; degradation; forecasting; ship systems; management process; complex; adaptation; system monitoring; management processes; decision support.

© Никитюк П. В., Мельник О. М.

Статтю прийнято до редакції 16.06.2025