

271 РІЧКОВИЙ ТА МОРСЬКИЙ ТРАНСПОРТ

УДК 629.5.018.7

DOI: 10.31498/2225-6733.52.2025.351119

**ДИНАМІЧНА МОДЕЛЬ ПРОГНОЗУВАННЯ РИЗИКУ ДЛЯ АВТОНОМНИХ СУДЕН З
ВРАХУВАННЯМ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ ТА СТІЙКОСТІ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ**

- Бурлаченко Д.А.** *ст. викладач, Одеський національний морський університет, м. Одеса, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3749-4908>, e-mail: capt.d.burlachenko@gmail.com;*
- Мельник О.М.** *д-р техн. наук, професор, Одеський національний морський університет, м. Одеса, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9228-8459>, e-mail: m.onmu@ukr.net;*
- Пастернак О.Я.** *ст. викладач, Одеський національний морський університет, м. Одеса, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5174-3371>, e-mail: kptransit@ukr.net;*
- Пуляєв І.О.** *ст. викладач, Одеський національний морський університет, м. Одеса, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0592-032X>, e-mail: pulio@ukr.net;*
- Чеча О.П.** *ст. викладач, Одеський національний морський університет, м. Одеса, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7155-6143>, e-mail: alexander.checha1945@gmail.com*

У даній статті представлено комплексний підхід до прогнозування експлуатаційного ризику автономного морського судна в умовах високої невизначеності, деградації технічних систем і змінних умов середовища. Традиційні методи управління ризиком виявляються недостатньо ефективними у ситуаціях, коли відсутній постійний контроль з боку оператора, тому в статті запропоновано динамічну адаптивну модель, що враховує як внутрішні (технічні та поведінкові) фактори, так і зовнішні навантаження (погодні умови, щільність руху, інформаційні збої). Основу моделі становить інтегрований індекс ризику (SIRI), який синтезує вплив деградації безпекових бар'єрів, ймовірність збоїв підсистем, поведінкові відхилення екіпажу (у разі часткової автономії), а також невизначеність у вхідних даних. Для оцінки майбутніх станів системи застосовано методи глибинного навчання, зокрема LSTM-архітектури, що дозволяють аналізувати часову динаміку ризику. Модифікатори поведінки екіпажу вводяться у вигляді коефіцієнтів впливу на ефективність бар'єрів, що дозволяє імітувати сценарії втоми, неувважності або помилок оператора. Представлена модель включає експоненційні функції деградації, ймовірнісні розподіли невизначеності та рекурентні схеми прогнозування і запропоновано верифікацію на прикладах чисельного експерименту, де порівнюються базові, стресові та комбіновані сценарії, включаючи каскадні відмови, втрату контролю та зовнішні збурення. Отримані результати засвідчили здатність системи своєчасно виявляти загрози тренди зростання ризику та прогнозувати час досягнення критичних порогів, що підкреслює перспективи впровадження запропонованої моделі у адаптивні системи управління автономними суднами.

Ключові слова: автономне судноплавство, експлуатаційний ризик, морський транспорт, системи судна, індекс ризику, електронна навігація, адаптивне управління, прогнозування ризику, поведінка екіпажу, морське середовище, критичні сценарії, ситуаційна обізнаність, багатофакторна оцінка, відмова підсистем, симуляція аварій, невизначеність, ризик-орієнтоване управління, судові операції, навігаційна безпека, система підтримки рішень, інтелектуальні навігаційні системи, інфраструктура порту, транспортна безпека, вплив людського фактору.

Актуальність дослідження

З поступовим переходом до автономного судноплавства системи управління ризиками повинні також трансформуватися з реактивних у прогностично-адаптивні, які спроможні передбачати небезпеки ще до їхнього прояву. На відміну від конвенційних суден, де ключові рішення приймаються капітаном, автономні судна (MASS) покладаються на алгоритмічні моделі, здатні інтегрувати дані з множинних джерел в реальному часі, що породжує нові виклики: зокрема, невизначеність поведінки об'єктів навколо судна, системна деградація технічних компонентів, коливання зовнішнього середовища та необхідність динамічної оцінки стійкості всіх систем управління автономним судном.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

У сучасних дослідженнях автономного судноплавства значна увага приділяється побудові моделей прогнозування ризиків, здатних функціонувати в умовах багатовимірної невизначеності. Робота Song et al. [1] є прикладом моделювання поведінки автономних суден з урахуванням людоподібної навігації та прийняття рішень, що дозволяє наблизити дії автономних платформ до очікувань інших учасників руху. Аналіз зіткнень у контексті автономних систем за допомогою комбінованих моделей FTA-FBN, як у [2], демонструє можливість ієрархічного моделювання складних ризиків.

Проблеми обмежених водних просторів вирішуються шляхом застосування нелінійного предиктивного керування [3] та багатомасштабної оцінки ризику на основі імовірнісних моделей траєкторій [4], що дозволяє адаптувати управління до змін середовища. Особливої уваги заслуговує підхід constraint-adaptive MPC з вбудованими бар'єрними функціями [5], що враховує як технічні обмеження судна, так і рівень ризику.

Інтеграція даних з AIS та LiDAR [6] забезпечує багатоканальну обробку інформації для точного виявлення цілей, що є основою для побудови надійної ситуаційної обізнаності. У [7, 8] розглядаються алгоритми автоматичного швартування з урахуванням розподілу навантаження на рушії та часової залежності ризиків – важливий аспект стійкості при маневруванні. Побудова динамічних байєсівських мереж [9] дозволяє адаптивно оновлювати оцінку навігаційних ризиків у реальному часі. Додатковий виклик становлять погодні умови, як показано в [10], де досліджено виявлення об'єктів в умовах зниженого огляду, що критично для автономних систем. Сфера малотоннажного судноплавства розглядається у [11], де ризики оцінюються на рівні експлуатаційного управління. Комбінація підходів у [12] дозволяє моделювати сценарії аварійного відшвартування. Інші вітчизняні дослідження [13-16] закладають основу для формування локалізованих моделей оцінки ризику, враховуючи людський фактор, сучасні системи курсовказання та фізичну безпеку суден.

Попри значне просування у застосуванні передових методів прогнозування, таких як моделі предиктивного управління (MPC) з ризик-адаптацією, динамічні байєсівські мережі (DBN), ймовірнісне сценарне моделювання або Gaussian Process Regression, існуючі підходи переважно зосереджені на локальних аспектах безпеки: алгоритмами уникнення зіткнень, інтервалами прогнозу з урахуванням невизначеності траєкторій та реакцією на критичні події в реальному часі. Проте в них бракує інтегративного індексу, що охоплював би не лише технічні й навігаційні параметри, але й поведінкові, когнітивні та зовнішньо-середовищні фактори в єдиному адаптивному прогнозному середовищі. Саме цю прогалину має на меті заповнити розроблена в статті модель на базі інтегрованого індексу ризику SIRI, яка забезпечує комплексну оцінку поточного стану об'єкта та здатна прогнозувати динаміку розвитку ризиків з урахуванням деградації систем і впливу людського чинника.

Постановка проблеми

Сучасні автономні судна функціонують у надзвичайно складному, динамічному середовищі, що постійно змінюється і насичене невизначеністю як у технічних параметрах, так і в зовнішніх умовах (погодні зміни, поведінка інших суден, навігаційні загрози).

При цьому відсутність безпосереднього людського втручання вимагає абсолютно нових підходів до оцінки та прогнозування ризиків. Існуючі методи оцінки ризику часто не враховують часову еволюцію деградації підсистем, колективний ефект поведінки інших об'єктів та мінливість стану та ступінь стійкості судових систем до навантажень, що обмежує здатність до проактивного управління ризиком і є критично важливим у контексті розвитку автономного судноплавства.

Мета статті

Метою дослідження є створення динамічної математичної моделі прогнозування експлуатаційного ризику автономного морського судна, яка здатна відображати часову деградацію елементів безпеки, враховувати високий рівень невизначеності у внутрішніх і зовнішніх параметрах середовища, а також забезпечувати оцінку змінної системної стійкості судна до зовнішніх загроз. Окрема увага приділяється інтеграції багатofакторної інформації в єдиний адаптивний індикатор – індекс ризику, який може бути використаний для підтримки прийняття рішень у режимі реального часу.

Виклад основного матеріалу

Автономне надводне судно (MASS) – це кіберфізична система з динамічним ступенем самостійності, яка оперує в межах заданих навігаційних сценаріїв та переметрів і здатна до прийняття рішень і адаптації до поточних умов без прямої участі оператора і яка включає в себе елементи безпеки, ергатики і інформаційно-комунікаційні технології.

Для комплексного дослідження автономного надводного судна (MASS) вихідною точкою є конвенційне судно, яке слугує базовою моделлю і яке містить повний набір функціональних систем і підсистем із правил, регламентованих міжнародними нормами (SOLAS, COLREG, MARPOL тощо). Саме власне на базі аналізу традиційної судової архітектури та системного підходу до її автоматизації став можливий подальший розвиток рівня автономізації – починаючи від допоміжного контролю до абсолютно автономного судна без екіпажу.

Узагальнена структура класів автономності суден згідно з класифікацією IMO (MSC.1/Circ.1640), яка є найбільш визнаною на міжнародному рівні, представлена в таблиці 1.

Кожен рівень передбачає зростання складності ергатичної взаємодії. У деяких класифікаціях (наприклад, DNV або Lloyd's Register) можуть бути додаткові підрівні або альтернативні терміни: *Smart Ship*, *Unmanned Vessel*, *Cyber-Physical Ship*. В контексті даного дослідження доцільно розглядати конвенційне судно як базову модель, від якої відштовхується автономізація.

Таблиця 1

Класи автономності суден (MASS)			
Рівень	Назва	Опис	Приклад
Level 0	Неавтономне	Повністю керується екіпажем, який перебуває на борту судна	Звичайне конвенційне торговельне судно
Level 1	Автоматизоване	Судно має автоматизовані системи, але екіпаж контролює всі функції	Судно з системами навігації ECDIS, РЛС, автопілотом
Level 2	Дистанційно кероване з екіпажем	Судно керується з берега, але екіпаж присутній на борту	Судно з системами берегового дублювання і управління
Level 3	Дистанційно кероване без екіпажу	Судно повністю керується з берега, екіпаж на борту відсутній	Безекіпажне судно з оператором на березі
Level 4	Повністю автономне	Судно приймає рішення самостійно, без участі людини	Судно з AI-навігацією, автономним маршрутом

У процесі оцінювання ризиків для морських суден важливо виділити основні групи параметрів, що визначають загальний рівень надійності та безпеки їх експлуатації. Така системна класифікація дозволяє деталізувати природу потенційних загроз, забезпечити цілісний підхід до аналізу й розроблення ефективних механізмів управління ризиками. Опис системної ідентифікації факторів ризику передбачає структурований підхід до виділення ключових груп параметрів, що впливають на надійність та безпеку судових операцій. На першому етапі аналізу всі ризики були розподілені на чотири основні групи:

- технічні параметри судна, які включають оцінку функціонального стану основних елементів судової системи, зокрема енергетичних установок, навігаційного обладнання, а також обчислювальних і керуючих модулів. Від справності цих компонентів залежить здатність судна виконувати основні функції в штатному та аварійному режимах;
- параметри зовнішнього середовища, які охоплюють такі фактори, як погодні умови (вітер,

хвилювання, видимість), інтенсивність судноплавного трафіку, гідрологічні й географічні особливості району плавання. Такі параметри можуть як прямо, так і опосередковано підвищувати рівень експлуатаційного ризику;

- функціональні взаємозв'язки підсистем, які характеризують імовірність каскадної деградації у разі порушення зв'язків між підсистемами (наприклад, відмова однієї підсистеми може спричинити збої в інших через функціональні залежності);

- невизначеність інформаційних джерел, яка пов'язана з якістю даних, що надходять від сенсорів та зовнішніх систем, зокрема можливістю появи шуму, затримками у передачі сигналу, а також неповнотою або розбіжностями у вхідній інформації. Такий розподіл дозволяє цілісно аналізувати ризики, враховуючи як технічні, так і організаційні й інформаційні аспекти функціонування судової системи, Рис. 1.

Зведена структура основних груп факторів ризику наведена у Таблиці 2.



Рис. 1 – Ключові групи параметрів впливу на надійність та безпеку судових операцій

Таблиця 2

Основні групи факторів ризику для суднових операцій

Група факторів	Характеристика/приклади
Технічні параметри судна	Стан енергетичних установок, навігаційного обладнання, обчислювальних і керуючих модулів
Параметри зовнішнього середовища	Метеоумови, видимість, хвилювання, трафік, гідрологічні/географічні перешкоди
Функціональні взаємозв'язки підсистем	Імовірність каскадної деградації, взаємозалежність та взаємовплив підсистем
Невизначеність інформаційних джерел	Шум, затримки передачі, неповнота чи некоректність даних від сенсорів і систем

Представлена класифікація створює основу для цілісного ризик-аналізу та дозволяє визначити критичні області, які вимагають особливої уваги при плануванні експлуатації або модернізації суднових систем. Розподіл ризиків за цими чотирма напрямками підвищує точність і результативність подальших заходів щодо підвищення надійності, сприяє формуванню адресних програм моніторингу та вдосконалення процедур управління як на рівні окремих підсистем, так і всієї суднової інфраструктури загалом.

На рисунку 2 подано концептуальну модель взаємозв'язків між основними групами факторів ризику, що впливають на загальну безпеку та надійність

систем управління автономним судном, де відображено, як технічні параметри судна, параметри зовнішнього середовища, функціональні взаємозв'язки підсистем і інформаційна невизначеність формують комплексну структуру ризиків та визначають рівень експлуатаційної безпеки.

Зокрема, показано, як сильні, так і слабші впливи окремих факторів, а також їхній взаємозв'язок із навігаційним станом судна, автоматизацією та іншими характеристиками дозволяє ідентифікувати критичні зони та встановити пріоритети для підвищення надійності функціонування суднових систем.



Рис. 2 – Концептуальна модель взаємозв'язків між основними групами факторів ризику

Методологія побудови моделі прогнозування експлуатаційного ризику автономного морського судна (АМС)

Методологія дослідження ґрунтується на поєднанні системного підходу до аналізу факторів ризику, формалізації процесів деградації технічних бар'єрів, застосування рекурентного прогнозування на основі LSTM-мереж (Long Short-Term Memory), тобто особливого типу рекурентної нейронної мережі (RNN), яка здатна запам'ятовувати інформацію на довгі проміжки часу, а також адаптивної інтеграції невизначеності в структуру управлінських рішень. Нижче представлено ключові етапи моделі.

1. Системна ідентифікація факторів ризику. На початковому етапі було здійснено декомпозицію ризиків на чотири основні групи параметрів, представлених у Таблиці 1. Всі ці параметри формалізуються у вигляді вектора стану системи:

$$\mathbf{X}(t) = [x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)], \quad (1)$$

та вектора випадкових збурень або зовнішніх впливів:

$$\mathbf{U}(t) = [u_1(t), u_2(t), \dots, u_m(t)], \quad (2)$$

які є вхідними змінними для прогновної моделі ризику.

2. Моделювання деградації бар'єрів безпеки. Кожна критична підсистема безпеки моделюється як бар'єр $B_j(t)$, ефективність якого змінюється в часі згідно із законом експоненційного згасання:

$$B_j(t) = B_j^0 \cdot e^{-\lambda_j t}, \quad (3)$$

де: B_j^0 – початковий рівень ефективності (в нормальних умовах), λ_j – індивідуальний коефіцієнт деградації, що залежить від надійності елементу, t – поточний момент часу.

Такий формалізований підхід дозволяє оцінювати накопичення деградації у ключових компонентах судна, що є основою для розрахунку зміни ризику.

3. Динамічне прогнозування інтегрованого ризику. На основі часових рядів параметрів $\mathbf{X}(t)$ та збурень $\mathbf{U}(t)$ будується модель прогнозування інтегрованого ризику із застосуванням нейронної мережі з довготривалою пам'яттю (LSTM). Прогнозована величина ризику в майбутній момент часу $t + \tau$ обчислюється як:

$$R(t + \tau) = f_{LSTM}(\mathbf{X}(t), \mathbf{U}(t)). \quad (4)$$

Паралельно розраховується рівень системної стійкості $RI(t)$ як відношення між наявним запасом безпеки $M(t)$ та поточним інтегрованим ризиком $S(t)$:

$$RI(t) = \frac{M(t)}{S(t)}, \quad (5)$$

де: $M(t)$ – сукупна здатність системи протистояти впливу зовнішніх загроз, $S(t)$ – інтегрований ризик, агрегований з урахуванням усіх підсистем.

4. Адаптація до невизначеності. У моделі передбачено інтеграцію параметрів, що подаються не як точкові значення, а як розподіли ймовірностей – зокрема для метеоданих, щільності руху, стану каналів зв'язку. Враховується:

- модифікація вагових коефіцієнтів:
- $$w_j(t) = w_j^0 + \Delta w_j(t);$$
- зміна пріоритетності джерел даних;
 - динамічне оновлення порогів реагування в залежності від ризик-прогнозу.

Таким чином, система зберігає адаптивність навіть за умов неповної або нечіткої інформації.

5. Сценарний аналіз та моделювання. Для верифікації моделі застосовано низку тестових сценаріїв, що імітують реальні ситуації:

- різка зміна погодних умов (штормові умови, обмежена видимість);
- вихід з ладу окремих підсистем (системи контролю, зв'язок);
- втрата взаємодії з береговим центром управління;
- поведінкові порушення екіпажу у гібридному режимі.

6. Результати оцінювались за допомогою часових графіків еволюції $R(t)$ та $RI(t)$, поверхневих карт ризику з візуалізацією зон небезпеки та ідентифікації критичних точок – моментів перетину ризиком допустимого порогу.

Отже модель базується на формалізації поточного та прогнозованого стану суднових підсистем $\mathbf{X}(t) = [x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)]^T$ та $\mathbf{U}(t) = [u_1(t), u_2(t), \dots, u_m(t)]^T$, де $x_i(t)$ – параметри підсистем (енергетична установка, управління рухом, системи навігації), n – кількість підсистем, $u_j(t)$ – чинники невизначеності: помилки сенсорів, екзогенні впливи, динаміка середовища.

Модель деградації бар'єрів безпеки (3) демонструє експоненційно зменшувану ефективність кожного бар'єру і показує, що захисна система (наприклад, технічний бар'єр або людська увага) з часом слабшає, тобто поступово втрачає ефективність, чим більший коефіцієнт деградації, тим швидше вона «виснажується».

Визначення ризику на основі ймовірності відмов та втрати ефективності бар'єрів:

$$P(C_j(t)) = 1 - e^{-\beta_j(1-B_j(t))\Delta t}$$

$$S(t) = \sum_{j=1}^n w_j \cdot P(C_j(t)), \quad (6)$$

де: $P(C_j(t))$ – ймовірність відмови підсистеми j у момент часу t ; w_j – ваговий коефіцієнт критичності j -ї підсистеми; $S(t)$ – інтегральний (агрегований) ризик для всієї системи.

Прогнозування ризику з LSTM-моделлю:

$$\hat{S}(t + \tau) = f_{LSTM}(\mathbf{X}_{t-\delta:t}, \mathbf{U}_{t-\delta:t}), \quad (7)$$

де δ – глибина вікна історії, τ – горизонт прогнозу.

Тоді індекс запасу безпеки та стійкості буде:

$$M(t) = S_{crit} - S(t)$$

$$RI(t) = \frac{M(t)}{S(t)} \cdot \eta(t), \quad (8)$$

де S_{crit} – критичний рівень ризику, $\eta(t)$ – поправка на системні резерви.

Умови реагування If $S(t) \geq S_{crit} \Rightarrow$ активувати протокол захисту, If $RI(t) < \theta \Rightarrow$ перенаправити або уповільнити, де θ – поріг стійкості.

Таким чином, запропонована математична модель враховує часову динаміку технічних параметрів разом з ступенем деградації бар'єрів безпеки, а також вплив невизначеності навколишнього середовища. Використання прогностичної складової на основі LSTM дозволяє заздалегідь оцінити та змодельовати поточний рівень ризику, а показники запасу міцності та стійкості системи слугують основою для активації захисних протоколів та адаптації стратегій управління.

У таблиці 3 представлено параметри моделі, які характеризують технічний стан, ефективність бар'єрів безпеки та часову динаміку деградаційних процесів.

Таблиця 3

Основні параметри математичної моделі прогнозування ризику для автономного судна

№	Позначення	Назва параметра	Одиниця виміру
1	$P(C_j)$	Ймовірність відмови підсистеми j	Безрозмірна
2	$EB_j(t)$	Ефективність бар'єру безпеки j в момент часу t	Безрозмірна (0-1)
3	$R_j(t)$	Поточний ризик підсистеми j	Умовні одиниці ризику
4	w_j	Ваговий коефіцієнт критичності підсистеми j	Безрозмірна
5	$S(t)$	Агрегований ризик системи у момент часу t	Умовні одиниці
6	$SIRI(t)$	Інтегрований індекс експлуатаційного ризику	Безрозмірна (0-1)
7	$M(t)$	Поточний запас безпеки	Умовні одиниці
8	T_{crit}	Прогнозований час до досягнення критичного ризику	Години
9	RI	Індекс стійкості системи	Безрозмірна (0-1)
10	λ_j	Коефіцієнт деградації бар'єру безпеки	1/год
11	t	Час експлуатації/симуляції	Години

Результати та обговорення

З метою верифікації та практичного випробування запропонованої моделі динамічного прогнозування експлуатаційного ризику автономного морського судна було реалізовано серію чисельних експериментів. Кожен сценарій змодельовано в умовах змінного морського середовища, з урахуванням деградації технічних бар'єрів, зовнішніх впливів та поведінкових чинників. Аналіз охоплює часовий інтервал $t = 0 \dots 100$ годин з кроком 1 год, а результати подано у вигляді кривих динаміки індексу $SIRI(t)$ – інтегрального показника експлуатаційного ризику.

На рисунку 3 подано динаміку зміни індексу експлуатаційного ризику ($SIRI$) для чотирьох ключових сценаріїв упродовж 100 годин.

На графіку відображено, як різні фактори, від деградації систем до людських помилок впливають на зниження ефективності безпеки судна, демонструючи ефективність моделі для виявлення критичних моментів і застосування можливості проактивного управління безпекою автономних морських суден на основі динамічного прогнозування.

Так, базовий сценарій демонструє повільне зниження ризику, що залишається в межах безпечного рівня впродовж усього періоду, що свідчить про стабільну роботу судових систем без критичних зовнішніх втручань. Сценарій втрати живлення показує різкий спад індексу через інтенсивну деградацію енергетичних підсистем, що ілюструє вразливість судна до технічних збоїв. Зниження ризику в стресовому

середовищі помірно, проте стабільне, демонструючи вплив навколишніх умов (наприклад, шторму) на загальний рівень безпеки. Комбінований збій включає технічну деградацію та фактор екіпажу (поведінкові

помилки) і це призводить до коливань і прискореного досягнення критичної зони і є найнебезпечнішим сценарієм серед представлених.

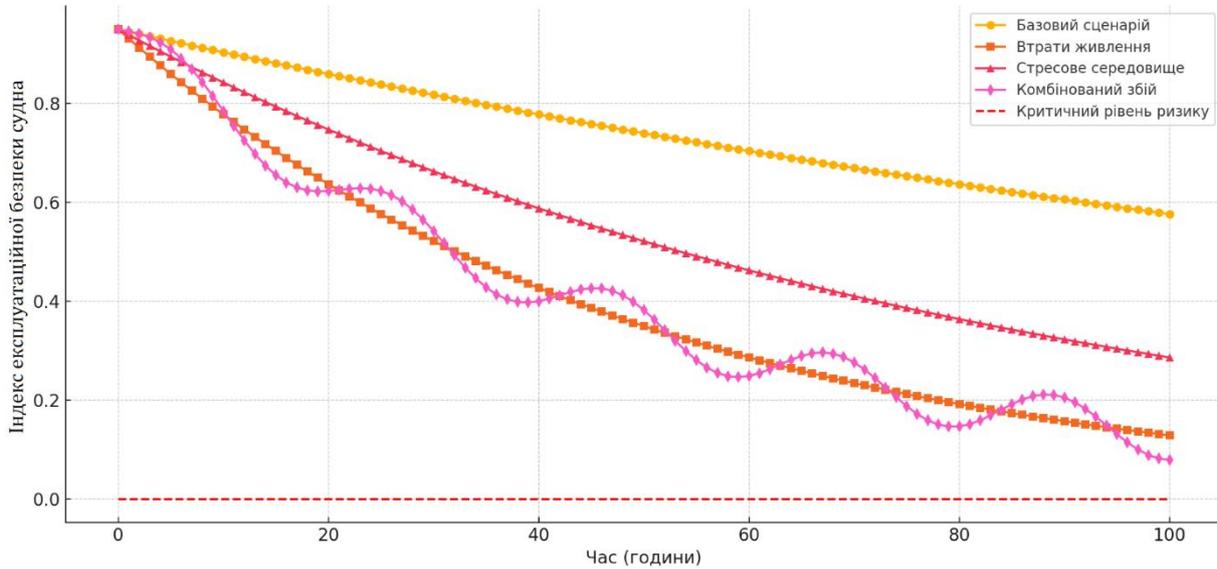


Рис. 3 – Динаміка зміни індексу експлуатаційної безпеки судна для чотирьох основних сценаріїв

На рисунку 4 подано зміну індексу експлуатаційного ризику (SIRI), який зростає з часом, що відповідає логіці прогресуючої деградації технічних систем,

зовнішньому навантаженню та впливу поведінкових факторів.

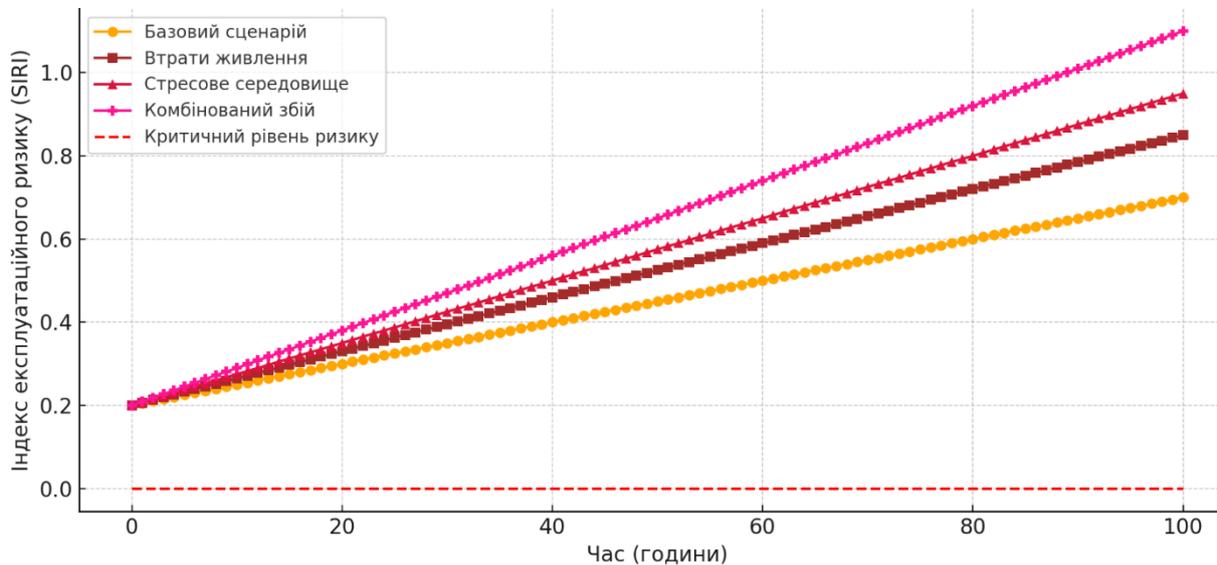


Рис. 4 – Динаміка зростання індексу ризику (SIRI) з плином часу

На графіку представлено динаміку зростання SIRI для чотирьох ключових сценаріїв протягом 100 годин, де базовий сценарій демонструє повільне накопичення ризику, тобто система залишається в межах допустимого рівня безпеки протягом тривалого часу. Втрати живлення призводять до більш інтенсивного зростання

ризиків, особливо в середньостроковій перспективі. Щодо стресового середовища (наприклад, штормові умови або навігаційні небезпеки), то воно ще більше пришвидшує динаміку зростання ризиків. Комбінований збій поєднує технічні відмови та поведінкові

чинники, що також веде до найшвидшого досягнення критичного рівня.

Схема на рисунку 5 відображає взаємозалежну структуру формування інтегрального ризику безпеки експлуатації автономного судна та його систем.

Основна ідея – це взаємозв’язок різних типів ризиків (технічні, зовнішні, оперативні/організаційні), які формують єдиний ризиковий фон, що визначає рівень безпеки експлуатації.

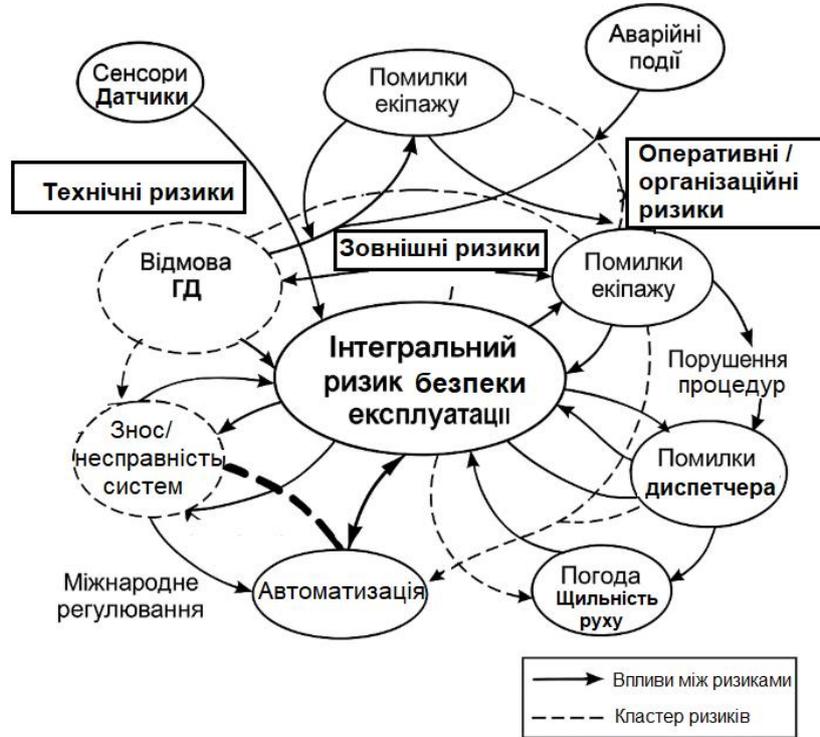


Рис. 5 – Структура формування інтегрального ризику безпеки експлуатації автономного судна

На схемі окреслено ключові кластери ризиків:

- технічні ризики: знос/несправність систем, відмова головної двигунної установки (ГД), несправності сенсорів;
- зовнішні ризики: погодні умови, інтенсивність трафіку, міжнародне регулювання;
- оперативні/організаційні ризики: помилки екіпажу, помилки диспетчера, порушення процедур, аварійні події.

Особлива увага тут приділена ролі рівня автоматизації як чинника, що може одночасно зменшувати частину ризиків, але й створювати нові (наприклад, через втрату контролю чи складність системних відмов), і представлена системна карта дає змогу чітко ідентифікувати напрямки впливу між типами ризиків (суцільна – міжкласові впливи, пунктир – зв’язки всередині кластера), а також описує, як ризики накопичуються й передаються між окремими ланками експлуатації судна, допомагаючи виявити критичні точки для моніторингу, профілактики й підвищення рівня безпеки.

У підсумку представлений графічний аналіз результатів чисельного моделювання відображає динаміку зростання експлуатаційного ризику у різних

сценаріях. Базовий сценарій підтверджує стабільність автономної суднової системи в умовах незначної деградації, коли рівень ризику зростає повільно і залишається в межах допустимого. Проте вже незначне збільшення швидкості деградації технічних бар’єрів або поява зовнішніх дестабілізуючих факторів, а саме погодні умови чи інформаційні збої, веде до значно пришвидшеного накопичення ризику.

Найбільш критичним виявився сценарій комбінованого впливу технічних збоїв і поведінкових помилок, у якому ризик зростає удвічі швидше і досягає порогу критичності значно раніше, ніж в інших випадках, що свідчить про високий ступінь взаємозалежності між підсистемами та важливість комплексного моніторингу як технічних параметрів, так і людського чинника. Представлена модель демонструє не лише здатність до раннього виявлення ризику, але й потенціал для використання як основи адаптивного управління автономним судном у реальному часі.

Висновки

У статті розроблено та обґрунтовано інтегровану динамічну модель прогнозування ризиків для автономних морських суден, яка враховує не лише технічну

деградацію систем, а й психофізіологічний стан екіпажу, параметри зовнішнього середовища та невизначеність. На основі індексу SIRI (Smart Integrated Risk Index), який служить єдиним показником рівня експлуатаційного ризику використано формалізовану експоненціальну модель деградації бар'єрів безпеки та змодельовано часову динаміку зниження їх ефективності. Враховано невизначеність інформаційних потоків, що дозволяє гнучко змінювати пороги реагування. Модель дає змогу виявляти критичні сценарії до їхнього настання, що важливо для проактивного управління ризиками в автономному судноплаванні. Запропоновано інтеграцію в інтелектуальні системи судноводіння, такі як навігаційні інтерфейси та платформи підтримки прийняття рішень (DSS). Також за можливе є застосування в реальному часі завдяки структурі, яка здатна адаптуватися до змін. Застосування моделі в симуляційному середовищі для різних типів сценаріїв експлуатації автономного судна показало її ефективність у зниженні рівня ризику та підвищенні стійкості систем управління.

Перелік використаних джерел

- [1] Enhancing collision avoidance in mixed waterborne transport: Human-mimic navigation and decision-making by autonomous vessels / Song R., Papadimitriou E., Negenborn, R. R., Van Gelder P. *Ocean Engineering*. 2025. Vol. 322. Article 120443. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2025.120443>.
- [2] Li P., Wang Y., Yang Z. Risk assessment of maritime autonomous surface ships collisions using an FTA-FBN model. *Ocean Engineering*. 2024. Vol. 309. Article 118444. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.118444>.
- [3] Nonlinear model predictive control for path following of autonomous inland vessels in confined waterways / C. Zhang et al. *Ocean Engineering*. 2025. Vol. 334. Article 121592. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2025.121592>.
- [4] Multi-scale collision risk assessment in restricted waters considering ship trajectory uncertainty / J. Du et al. *Reliability Engineering & System Safety*. 2025. Vol. 265. Article 111511. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ress.2025.111511>.
- [5] Xue H., Lai Y., Sun K. Human-like constraint-adaptive model predictive control with risk-tunable control barrier functions for autonomous ships. *Ocean Engineering*. 2024. Vol. 308. Article 118219. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.118219>.
- [6] Von Brandis A., Menges D., Rasheed A. Multi-Target Tracking for Autonomous Surface Vessels Using LiDAR and AIS Data Integration. *Applied Ocean Research*. 2024. Vol. 154. Article 104348. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apor.2024.104348>.
- [7] Robust sliding mode model predictive control and thrust allocation methods for autonomous berthing of water-jet propulsion unmanned surface vehicles / Qi J., Liang W., Xie W., Peng Y. *Ocean Engineering*. 2025. Vol. 331. Article 121280. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2025.121280>.
- [8] A dynamic-static combination risk analysis framework for berthing/unberthing operations of maritime autonomous surface ships considering temporal correlation / Luo X., Ling H., Xing M., Bai X. *Reliability Engineering & System Safety*. 2024. Vol. 245. Article 110015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ress.2024.110015>.
- [9] Navigation risk assessment for ocean-going ships in the north pacific ocean based on an improved dynamic Bayesian network model / Wang Y., Qian L., Hong M., Li D. *Ocean Engineering*. 2024. Vol. 315. Article 119804. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.119804>.
- [10] Object detection for autonomous vehicles under adverse weather conditions / Z. Chen et al. *Expert Systems With Applications*. 2026. Vol. 296. Article 128994. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2025.128994>.
- [11] An operational risk management approach for small fishing vessel / F. Obeng et al. *Reliability Engineering & System Safety*. 2024. Vol. 247. Article 110104. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ress.2024.110104>.
- [12] Toward modeling emergency unmooring of manned and autonomous ships - A combined FRAM+HFACs-MA approach / J. Nasur et al. *Safety Science*. 2024. Vol. 181. Article 106676. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2024.106676>.
- [13] Мельник О. М., Бичковський Ю. В. Сучасна методика оцінки рівню безпеки судна та шляхи його підвищення. *Розвиток транспорту*. 2021. № 2(9). С. 37-46. DOI: <https://doi.org/10.33082/td.2021.2-9.03>.
- [14] Мельник О. М., Бичковський Ю. В. Врахування фактору стресу у системі забезпечення безпеки мореплавства. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2021. Т. 32(71), № 4. С. 260-264. DOI: <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2021.4/39>.
- [15] Огляд та перспективи використання сучасних систем курсовказання на морських суднах для забезпечення навігаційної безпеки / Мельник О. М., Щербина О. В., Корякін К. С., Бурлаченко Д. А. *Наукові вісті Дніпровського університету*. 2021. № 21. DOI: <https://doi.org/10.33216/2222-3428-2021-21>.
- [16] Актуальні проблеми морської безпеки та сучасні шляхи забезпечення охорони судна / О. М. Мельник та ін. *Комунальне господарство міст*. 2021. № 6(166). С. 204-210. DOI: <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2021-6-166-204-210>.

DYNAMIC MODEL OF RISK PREDICTION FOR AUTONOMOUS VESSELS TAKING INTO ACCOUNT UNCERTAINTY AND STABILITY OF CONTROL SYSTEMS

Burlachenko D.	senior lecturer, Odessa National Maritime University, Odessa, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3749-4908 , e-mail: capt.d.burlachenko@gmail.com ;
Melnyk O.	D.Sc. (Engineering), professor, Odessa National Maritime University, Odessa, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9228-8459 , e-mail: m.onmu@ukr.net ;
Pasternak O.	senior lecturer, Odessa National Maritime University, Odessa, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5174-3371 , e-mail: kptransit@ukr.net ;
Pulyaev I.	senior lecturer, Odessa National Maritime University, Odessa, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0592-032X , e-mail: pulio@ukr.net ;
Checha O.	senior lecturer, Odessa National Maritime University, Odessa, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7155-6143 , e-mail: alexander.checha1945@gmail.com

This article presents a comprehensive approach to predicting the operational risk of an autonomous marine vessel under conditions of high uncertainty, degradation of technical systems and changing environmental conditions. Traditional methods of risk management are not effective enough in situations where there is no constant control by the operator, so the article proposes a dynamic adaptive model that takes into account both internal (technical and behavioral) factors and external loads (weather conditions, traffic density, information failures). The model is based on an integrated risk index (SIRI) that synthesizes the impact of degradation of safety barriers, the probability of subsystem failures, crew behavioral deviations (in the case of partial autonomy), and uncertainty in input data. Deep learning methods, including LSTM architectures, are used to estimate future system states, allowing to analyze the time dynamics of risk. Crew behavior modifiers are introduced in the form of coefficients of influence on the effectiveness of barriers, which allows simulating scenarios of fatigue, inattention, or operator errors. The presented model includes exponential degradation functions, probabilistic uncertainty distributions, and recurrent forecasting schemes, and verification is proposed using numerical experiments comparing baseline, stress, and combined scenarios, including cascading failures, loss of control, and external disturbances. The obtained results demonstrate the system's ability to timely detect threatening risk trends and predict when critical thresholds will be reached, which emphasizes the prospects for implementing the proposed model in adaptive control systems for autonomous vessels.

Keywords: autonomous shipping, operational risk, maritime transport, ship systems, risk index, electronic navigation, adaptive control, risk prediction, crew behavior, maritime environment, critical scenarios, situational awareness, multi-factorial assessment, subsystem failure, accident simulation, uncertainty, risk-based management, ship operations, navigation safety, decision support system, intelligent navigation systems, port infrastructure, transport safety, human factor impact.

References

- [1] R. Song, E. Papadimitriou, R.R. Negenborn, and P. Van Gelder, "Enhancing collision avoidance in mixed waterborne transport: Human-mimic navigation and decision-making by autonomous vessels," *Ocean Engineering*, vol. 322, article 120443, 2025. doi: [10.1016/j.oceaneng.2025.120443](https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2025.120443).
- [2] P. Li, Y. Wang, and Z. Yang, "Risk assessment of maritime autonomous surface ships collisions using an FTA-FBN model," *Ocean Engineering*, vol. 309, article 118444, 2024. doi: [10.1016/j.oceaneng.2024.118444](https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.118444).
- [3] C. Zhang, A. Dhyani, J.W. Ringsberg, F. Thies, R.R. Negenborn, and V. Reppa, "Nonlinear model predictive control for path following of autonomous inland vessels in confined waterways," *Ocean Engineering*, vol. 334, article 121592, 2025. doi: [10.1016/j.oceaneng.2025.121592](https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2025.121592).
- [4] J. Du, J. Weng, Y. Xi, Q. Zhu, H. Ding, and K. Shi, "Multi-scale collision risk assessment in restricted waters considering ship trajectory uncertainty," *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 265, article 111511, 2025. doi: [10.1016/j.ress.2025.111511](https://doi.org/10.1016/j.ress.2025.111511).
- [5] H. Xue, Y. Lai, and K. Sun, "Human-like constraint-adaptive model predictive control with risk-tunable control barrier functions for autonomous ships," *Ocean Engineering*, vol. 308, article 118219, 2024. doi: [10.1016/j.oceaneng.2024.118219](https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.118219).
- [6] A. Von Brandis, D. Menges, and A. Rasheed, "Multi-Target Tracking for Autonomous Surface Vessels Using LiDAR and AIS Data Integration," *Applied Ocean Research*, vol. 154, article 104348, 2024. doi: [10.1016/j.apor.2024.104348](https://doi.org/10.1016/j.apor.2024.104348).
- [7] J. Qi, W. Liang, W. Xie, and Y. Peng, "Robust sliding mode model predictive control and thrust allocation methods for autonomous berthing of water-jet propulsion unmanned surface vehicles," *Ocean Engineering*, vol. 331, article 121280, 2025. doi: [10.1016/j.oceaneng.2025.121280](https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2025.121280).
- [8] X. Luo, H. Ling, M. Xing, and X. Bai, "A dynamic-static combination risk analysis framework for

- berthing/unberthing operations of maritime autonomous surface ships considering temporal correlation,” *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 245, article 110015, 2024. doi: **10.1016/j.ress.2024.110015**.
- [9] Y. Wang, L. Qian, M. Hong, and D. Li, “Navigation risk assessment for ocean-going ships in the north pacific ocean based on an improved dynamic Bayesian network model,” *Ocean Engineering*, vol. 315, article 119804, 2024. doi: **10.1016/j.oceaneng.2024.119804**.
- [10] Z. Chen et al., “Object detection for autonomous vehicles under adverse weather conditions,” *Expert Systems With Applications*, vol. 296, article 128994, 2026. doi: **10.1016/j.eswa.2025.128994**.
- [11] F. Obeng, D. Domeh, F. Khan, N. Bose, and E. Sanli, “An operational risk management approach for small fishing vessel,” *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 247, article 110104, 2024. doi: **10.1016/j.ress.2024.110104**.
- [12] J. Nasur, K. Bogusławski, P. Wolska, M. Gil, and K. Wróbel, “Toward modeling emergency unmooring of manned and autonomous ships - A combined FRAM+HFACS-MA approach,” *Safety Science*, vol. 181, article 106676, 2024. doi: **10.1016/j.ssci.2024.106676**.
- [13] O.M. Melnyk, and Y.V. Bychkovskiy, “Suchasna metodyka otsinky rivniu bezpeky sudna ta shliakhy yoho pidvyshchennia” [“Modern methods of ship safety level assessment and ways of its improvement”], *Rozvytok transportu – Transport Development*, vol. 2(9), pp. 37-46, 2021. doi: **10.33082/td.2021.2-9.03**.
- [14] O.M. Melnyk, and Y.V. Bychkovskiy, “Vrakhuvannia faktoru stresu u systemi zabezpechennia bezpeky moreplavstva” [“Stress factor in the system of the shipping safety”], *Vcheni zapysky Tavriiskoho natsionalnoho universytetu imeni V.I. Vernadskoho. Serii: Tekhnichni nauky – Scientific notes of Taurida National V.I. Vernadsky University. Series: Technical Sciences*, vol. 32(71)(4), pp. 260-264, 2021. doi: **10.32838/2663-5941/2021.4/39**.
- [15] O.M. Melnyk, O.V. Shcherbyna, K.S. Koryakin, and D.A. Burlachenko, “Ohliad ta perspektyvy vykorystannia suchasnykh system kursovkazannia na morskyykh sudnakh dlia zabezpechennia navihatsiinoi bezpeky” [“Review and prospects for using modern heading systems on sea-going ships to ensure navigational safety”], *Naukovi visti Dalivskoho universytetu – Scientific News of Daliv University*, vol. 21, 2021. doi: **10.33216/2222-3428-2021-21**.
- [16] O.M. Melnyk, S.P. Onyshchenko, O.V. Loginov, V.I. Okulov, and I.O. Puliayev, “Aktualni problemy morskoi bezpeky ta suchasni shliakhy zabezpechennia okhorony sudna” [“Actual problems of maritime safety and modern ways of ensuring the ship security”], *Komunalne gospodarstvo mist – Municipal Economy of Cities*, vol. 6(166), pp. 204-210, 2021. doi: **10.33042/2522-1809-2021-6-166-204-210**.

Стаття надійшла 02.08.2025

Стаття прийнята 11.08.2025

Стаття опублікована 29.12.2025

Цитуйте цю статтю як: Динамічна модель прогнозування ризику для автономних суден з врахуванням невідомості та стійкості систем управління / Д. А. Бурлаченко та ін. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2025. Вип. 52. С. 186-196. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.52.2025.351119>.