

ІНТЕГРОВАНА МОДЕЛЬ ОЦІНКИ ТА АДАПТИВНОГО УПРАВЛІННЯ
ЕКСПЛУАТАЦІЙНОЮ БЕЗПЕКОЮ МОРСЬКОГО СУДНА
В УМОВАХ ДИНАМІЧНОГО СЕРЕДОВИЩА

Никитюк П.В.

ст. викладач, Одеський національний морський університет, м. Одеса, ORCID:
<https://orcid.org/0000-0002-5905-3807>, e-mail: gelaevnyk@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

У статті запропоновано інтегровану модель оцінки та адаптивного управління експлуатаційною безпекою морського судна, яка враховує часову динаміку ризику, технічний стан підсистем, ефективність бар'єрів безпеки та вплив зовнішнього середовища. Модель базується на ймовірнісному підході та охоплює узагальнені індикатори безпеки: інтегрований індекс ризику, запас безпеки, прогнозований час до критичного стану і індекс стійкості системи. Розроблений алгоритм передбачає послідовний моніторинг параметрів, оцінку ризиків у підсистемах судна, моделювання деградації бар'єрів та динамічну агрегацію загального ризику. Верифікація проведена на основі восьми сценаріїв: від базового до стресових ситуацій (втрати живлення, комбінований вплив, інтенсивне маневрування тощо). Особливістю моделі є поєднання математичного моделювання з алгоритмічною логікою реагування, що включає умови активації захисту та адаптацію параметрів у реальному часі. Застосування часових рядів та LSTM-моделі для прогнозування ризику забезпечує випереджальне виявлення загроз і прийняття рішень ще до настання критичних ситуацій. Запропонована система може бути інтегрована в інтелектуальні платформи управління безпекою, зокрема в умовах автономного чи напівавтономного судноплавства. Модель має модульну структуру, що забезпечує її гнучкість і масштабованість для різних типів суден. Завдяки використанню вагових коефіцієнтів критичності підсистем, можлива адаптація логіки оцінювання під конкретні архітектури та експлуатаційні режими суден. У роботі особливу увагу приділено верифікації результатів на основі симульованих сценаріїв, які демонструють залежність індексу ризику та запасу безпеки від впливу окремих факторів, що дає змогу не лише здійснювати аналіз постфактум, але й активно формувати захисні стратегії, що є актуальним у контексті переходу до інтелектуальних систем управління на морському транспорті. Практична цінність моделі полягає у її здатності не лише оцінювати поточний рівень безпеки, а й формувати рекомендації щодо зміни швидкості, маршруту або режиму завантаження судна. Такий підхід забезпечує проактивне управління безпекою в умовах високої невизначеності та багатофакторних загроз.

Ключові слова: морський транспорт, експлуатаційна безпека судна, підтримка прийняття рішень, інтегрований індекс ризику, технічний стан, запас безпеки, часове моделювання, деградація бар'єрів, адаптивне управління, LSTM-прогнозування, алгоритм реагування, критичний час, процес навігації, автономне судноплавство, сценарне моделювання, ризик-орієнтована логіка.

Постановка проблеми

Зростаюча складність судових систем, автоматизація процесів управління та підвищення вимог до безпеки в умовах автономного плавання зумовлюють необхідність створення інтегрованих моделей аналізу експлуатаційного ризику. Традиційні підходи, такі як Fault Tree Analysis (FTA), Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) чи HAZOP забезпечують лише часткове охоплення багатофакторних взаємодій, не враховуючи часову деградацію бар'єрів безпеки, кумулятивний ефект технічного зносу систем та варіативність сценаріїв роботи судна. Особливо критично це для суден, які працюють у складних навігаційних умовах або виконують місії спеціального призначення, де вкрай важливе прийняття рішення є ключовою.

Забезпечення експлуатаційної безпеки суден в умовах зростаючої складності технічних систем, інтенсифікації навігаційних процесів і нестабільного морського середовища потребує нових підходів до оцінки та управління ризиками. Існуючі методи здебільшого орієнтовані на статичну або компонентну оцінку

окремих загроз і не враховують кумулятивний ефект, деградацію бар'єрів безпеки та часову динаміку зміни ризику. Недостатньо розробленими залишаються моделі, що дозволяють об'єднати в єдину інтеграційну структуру технічні, інформаційні та ситуаційні фактори небезпеки, а також сформувати основу для адаптивного контролю і прогнозного реагування.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Сучасні дослідження у сфері експлуатаційної безпеки морського транспорту демонструють зростаючу інтеграцію комп'ютерних технологій, методів машинного навчання та залучення ймовірнісного аналізу в системи оцінки ризику. Зокрема, значна увага приділяється застосуванню алгоритмів глибокого навчання для прогнозування поведінки суден у реальному середовищі [1], оцінки наслідків аварій [2] та побудови моделей траєкторії руху [3]. Дослідження [4, 5] акцентують увагу на ролі безпекових бар'єрів і пропонують методи їх кількісного оцінювання у межах операційного ризику судноплавства. Інші роботи [6-8] вивчають вплив

операційних обмежень, довготривалих навантажень та змін навколишнього середовища на стійкість та вразливість суден. У [9-11] запропоновано інтегровані підходи до оптимізації маршрутів переходу суден, управління часом затримками в портах та адаптації портової інфраструктури до суден автономного типу. Розширення методів прогнозування експлуатаційного стану судового обладнання [12], енергоефективності [13-15] та системного управління [16] створює підґрунтя для побудови багаторівневих інтелектуальних моделей. Окремо варто відзначити підходи, що об'єднують елементи штучного інтелекту, байєсівських мереж і нейромережевого контролю для аналізу поведінкових сценаріїв та оцінки впливу людського фактору на судні в умовах аварій [17, 18]. У межах дослідження експлуатаційної безпеки суден ключову роль відіграють інтегровані підходи до оцінки ризиків та аналізу деградації систем. Наукова праця [19] демонструє важливість мультифізичного моделювання для складних технічних систем, що є релевантним для морської галузі, в [20] представлено вейвлет-аналіз як інструмент для виявлення резонансних загроз у швартових умовах. В роботі [21] застосовано глибокі нейромережі для підвищення операційної ефективності суден у портах, що відображає сучасні тенденції цифровізації. Наукові публікації [22-25] фокусуються на стресових факторах, адаптивному управлінні безпекою, сучасних системах курсовказання та інформаційній безпеці суден, формуючи концептуальну основу для створення моделей, які враховують деградацію бар'єрів, індекс ризику *SIRI* та адаптивне реагування.

Таким чином, актуальною залишається задача формування інтегрованої, сценарно-чутливої моделі оцінювання ризику, що може адаптуватися до змінних умов, прогнозувати критичні стани та підтримувати прийняття рішень у реальному часі. Наявні підходи до оцінки безпеки морських суден є фрагментарними та недостатньо адаптивними в умовах змінного середовища. Відсутність механізмів об'єднання різномірних даних у єдину динамічну модель ускладнює оперативну діагностику та управління ризиками на борту. Зокрема, бракує ефективних моделей, які б поєднували технічну інформацію з поведінковими сценаріями ризику, що змінюються в часі.

Мета статті

Метою дослідження є розробка та верифікація інтегрованої ймовірнісної моделі оцінки експлуатаційної безпеки судна, здатної враховувати часову динаміку технічного стану, ефективність бар'єрів безпеки, зовнішні ризики та забезпечувати адаптивне управління ризиком в умовах змінного середовища. Для досягнення цієї мети сформульовано низку наукових завдань, зокрема: критичний аналіз сучасних методів оцінки експлуатаційної безпеки суден з урахуванням їх обмежень у динамічних умовах; побудова математичної моделі інтегрованого ризику з урахуванням

деградації бар'єрів, ймовірностей технічних відмов та зовнішніх факторів; формування узагальнених індикаторів безпеки, а саме індексу ризику (*SIRI*), запасу безпеки (*M*) та прогнозованого часу до досягнення критичного стану (T_{crit}). Додатково було реалізовано серію симуляційних сценаріїв для аналізу поведінки системи в умовах типових загроз, розроблено адаптивний алгоритм управління з візуалізацією логіки реагування, а також верифіковано точність і ефективність моделі.

Виклад основного матеріалу

Безпека морських суден в умовах динамічного середовища, технічної невизначеності та зростаючої складності судових систем залишається однією з ключових проблем експлуатації сучасного морського транспорту. З огляду на інтенсивний розвиток автономних навігаційних систем, комп'ютерних технологій і зростання обсягів міжнародних перевезень, питання оперативного моніторингу, оцінки та управління ризиками набуває особливої актуальності. Класичні моделі безпеки здебільшого обмежені аналізом статичних факторів і не враховують сукупний, часовий та інтегрований вплив зовнішніх та внутрішніх загроз. Такий підхід є недостатнім у контексті зростаючої складності сценаріїв функціонування сучасного судна.

У відповідь на такі виклики в даному дослідженні запропоновано інтегровану ймовірнісну модель експлуатаційної безпеки, яка дозволяє оцінювати ризики в режимі реального часу, адаптивно реагувати на їх зміну, а також прогнозувати ймовірність настання критичних подій. Модель охоплює технічний стан судових підсистем, ефективність захисних бар'єрів та зовнішні фактори середовища, що в сукупності формують динамічний індекс ризику. Особливістю підходу є поєднання математичного моделювання, аналізу сценаріїв, побудови інтегрованих індикаторів (*SIRI*, *M*, T_{crit}) та елементів адаптивного контролю. Запропонований методологічний апарат апробовано на основі моделювання типових судових сценаріїв з аналізом часових рядів та реалізацією алгоритмів прогнозування.

Для чисельної реалізації інтегрованої моделі оцінки експлуатаційної безпеки судна розроблено покроковий алгоритм симуляції, який враховує часову деградацію ефективності бар'єрів, зміну ймовірностей відмов підсистем, адаптацію вагових коефіцієнтів критичності, а також прогноз часу досягнення критичного рівня ризику. Алгоритм реалізований у вигляді циклічного процесу з динамічним оновленням параметрів у кожен момент часу (рис. 1).

У рамках моделювання застосовано покроковий алгоритм чисельної реалізації інтегрованої моделі оцінки експлуатаційної безпеки судна. Алгоритм базується на ітераційному підході з динамічним оновленням усіх ключових параметрів у кожен дискретний момент часу.

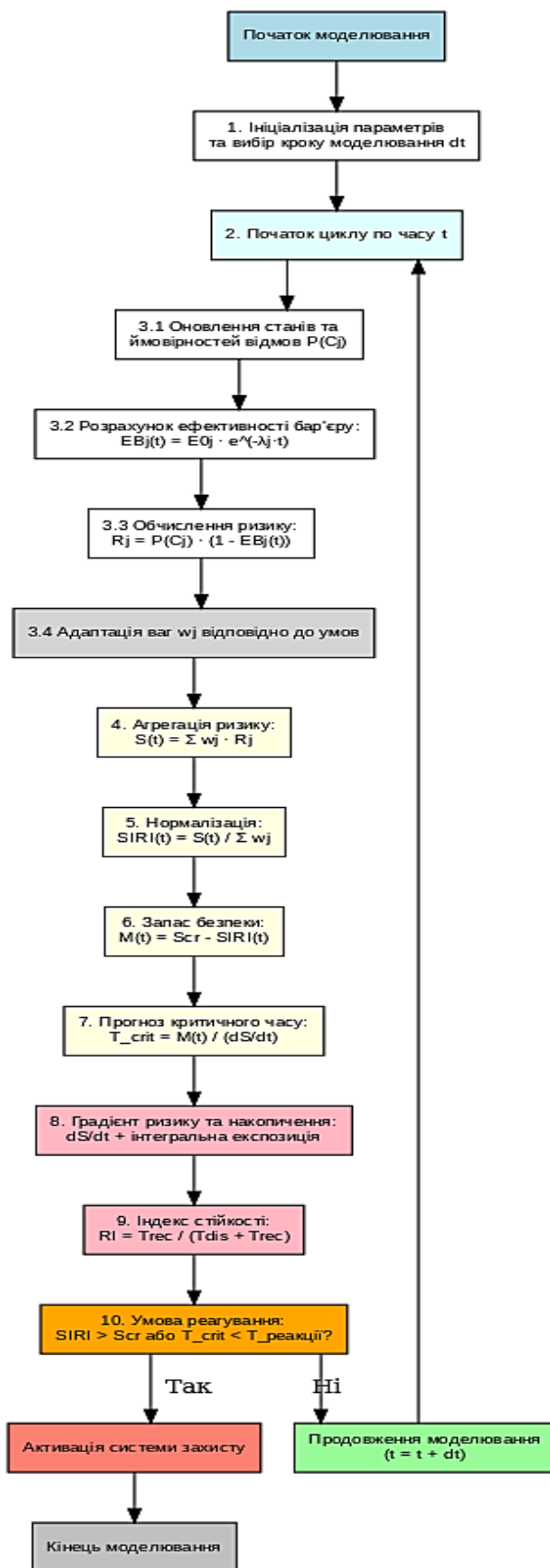


Рис. 1 – Алгоритм симуляційного моделювання оцінки інтегрованого ризику судна

На першому етапі здійснюється ініціалізація: встановлюються початкові значення параметрів кожної підсистеми – початкова ймовірність відмови, ефективність бар'єрів безпеки, коефіцієнти деградації та вагові коефіцієнти критичності. Задається також тривалість симуляції та часовий крок інтегрування.

Далі запускається основний часовий цикл, в межах якого відбувається послідовна симуляція для кожного моменту часу t . На кожній ітерації оновлюються ймовірності відмов підсистем $P(C_j)$ відповідно до моделювання їх поточного стану та зовнішніх умов. Паралельно виконується обчислення ефективності захисних бар'єрів на основі експоненційної деградаційної функції $E_{vj}(t)$.

У наступному блоці визначається ризик кожної підсистеми, що враховує втрату захисної функції бар'єрів. При необхідності реалізується динамічне коригування вагових коефіцієнтів w_j , що відображають критичність відповідної підсистеми у загальній структурі судна.

Сумарний ризик агрегується у загальний індекс безпеки $S(t)$, який нормалізується до інтегрованого індексу ризику $SIRI(t)$. Подальше моделювання передбачає обчислення запасу безпеки $M(t)$, а також прогноз часу до досягнення критичного рівня ризику T_{crit} . На завершальних етапах здійснюється оцінка швидкості зміни ризику dS/dt , розрахунок кумулятивного впливу та індексу стійкості системи RI . Система перевіряє умови для активації протоколу реагування перевищення $SIRI$ заданого порогу або наближення T_{crit} до допустимого інтервалу дій. У разі досягнення критичних значень активується блок безпеки, імітуючи сценарій

автоматизованого реагування. Таким чином, запропонований алгоритм дозволяє не лише відстежувати поточний рівень ризику, а й адаптивно прогнозувати майбутні загрози, забезпечуючи функціональну підтримку рішень для своєчасного реагування у складних умовах експлуатації суден.

Аналіз сценаріїв експлуатації судна.

Для демонстрації гнучкості та прикладного потенціалу інтегрованої моделі оцінки експлуатаційної безпеки було проведено імітаційне моделювання восьми типових сценаріїв. Сценарії охоплюють як стандартні умови експлуатації, так і кризові ситуації, пов'язані з деградацією підсистем, збоєм бар'єрів або екстремальними навантаженнями. Такий підхід дозволяє відобразити варіативність ризикових профілів сучасних суден та оцінити здатність системи адаптуватися до змін середовища.

Одним із ключових етапів валідації інтегрованої моделі є перевірка її ефективності в умовах різноманітних експлуатаційних сценаріїв судна. Такий підхід дозволяє оцінити стійкість системи до змін зовнішніх факторів і внутрішнього технічного стану, протестувати динаміку показників безпеки та адаптивність запропонованої моделі. Було реалізовано симуляцію восьми реалістичних сценаріїв: базового режиму, погіршення погодних умов, втрати бар'єрів безпеки, комбінованого впливу, критичних навантажень, втрати живлення, збоїв процесу навігації та інтенсивного маневрування. В таблиці 1 наведено результати розрахунків інтегрованого індексу ризику ($SIRI$) та відповідного запасу безпеки (M), які відображають зміну рівня загрози залежно від сценарію.

Таблиця 1

Результати моделювання індексу ризику ($SIRI$) та запасу безпеки (M)

Сценарій	Індекс ризику $SIRI$	Запас безпеки M
Базовий	0.0489	0.0011
Погіршення погоди	0.0475	0.0025
Втрата бар'єра	0.0477	0.0023
Комбінований вплив	0.0424	0.0076
Критичне навантаження	0.0391	0.0109
Втрати живлення	0.0370	0.0130
Збої процесу навігації	0.0385	0.0115
Інтенсивне маневрування	0.0442	0.0058

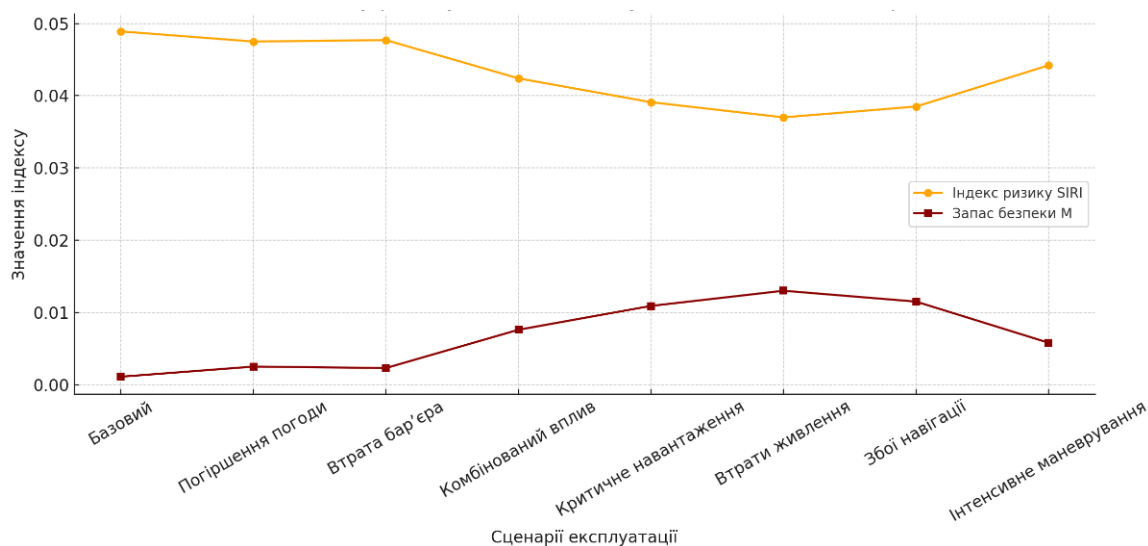
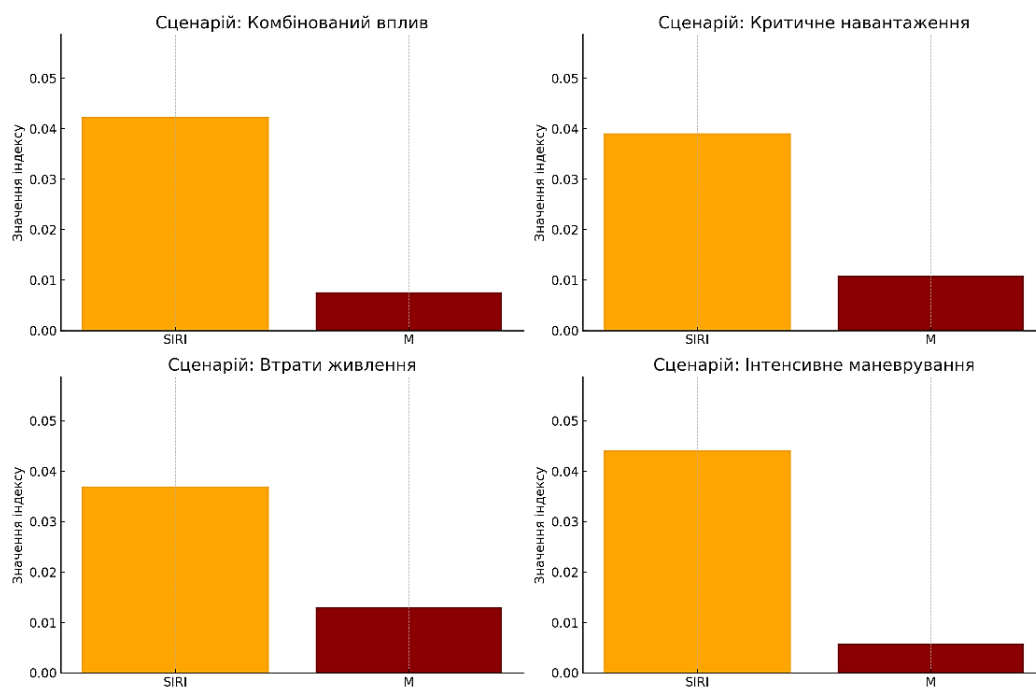
Як видно з представлених даних комбінований вплив характеризується зростаючим ризиком через сукупність зовнішніх факторів (погодні умови) та технічної деградації. Індекс $SIRI$ зменшується, однак запас безпеки M також помірний коли система функціонує на межі допустимого режиму. Критичне навантаження демонструє суттєве зменшення $SIRI$ та збільшення запасу безпеки. Це вказує на адаптивність системи до пікових навантажень за рахунок стратегії попередження ризику. Втрати живлення супроводжуються нижчим $SIRI$ та одним із найвищих значень M серед усіх сценаріїв, що свідчить про добру компенсаційну здатність

інших підсистем і правильну роботу бар'єрів. Інтенсивне маневрування демонструє повторне зростання ризику через нестабільність навігаційних параметрів, що формує ситуацію, близьку до порогу безпеки. Це підкреслює необхідність моніторингу таких умов у реальному часі.

Результати дослідження представлено на Рисунку 2, де графічно відображено динаміку індексу ризику $SIRI$ та запасу безпеки M в умовах реалізації різних сценаріїв. Зі зростанням складності сценаріїв система демонструє зниження загального ризику завдяки активації запобіжних бар'єрів та адаптивній корекції

критичності підсистем. Найбільш небезпечним виявився сценарій інтенсивного маневрування, за якого зафіксовано стрімке зростання *SIRI* та зниження запасу безпеки, що вказує на необхідність негайного реагування. Водночас, у сценаріях «Втрати живлення» та «Критичне навантаження» система продемонструвала проактивну поведінку, що дозволило забезпечити найбільше зростання запасу безпеки *M* і відповідно знизити критичність загального ризику.

Для деталізації впливу конкретних стресових умов на поведінку інтегрованої системи безпеки було проведено окремий аналіз чотирьох характерних сценаріїв: комбінованого впливу, критичного навантаження, втрати живлення та інтенсивного маневрування. На рисунку 3 представлено порівняльні діаграми, які ілюструють зміну значень інтегрованого індексу ризику (*SIRI*) та відповідного запасу безпеки (*M*) для кожного із зазначених сценаріїв.

Рис. 2 – Індекс *SIRI* та запас безпеки за сценаріямиРис. 3 – Зміна індексу ризику (*SIRI*) та запасу безпеки (*M*) у критичних сценаріях експлуатації судна

У цих кейсах видно динаміку ризику особливо те, що комбінований вплив має помірне зниження *SIRI* при збереженні мінімального запасу безпеки. Проте критичне навантаження демонструє найменший індекс ризику та стабільний запас. Втрати живлення показує найкраще значення *M*, що свідчить про ефективну компенсацію ризику. У випадку інтенсивного маневрування знову повторне зростання *SIRI*, що є важливою ознакою для активації моніторингу.

Одним з ключових елементів забезпечення експлуатаційної безпеки судна є своєчасне прогнозування моменту переходу однієї з суднових системи в небезпечний або критичний стан. Для цього в моделі інтеграційного ризику було реалізовано розрахунок часу до критичного рівня ризику T_{crit} , що базується на

поточному значенні загального індексу безпеки *S*, запасу безпеки *M* і швидкості зміни ризику dS/dt .

Для розуміння залежності між індексом ризику, запасом безпеки та часом до досягнення критичного стану (T_{crit}) побудовано поверхневу модель (Рисунк 4), яка дозволяє просторово візуалізувати динаміку поведінки системи та виявити «зони безпеки» або області, де низький ризик поєднується з достатнім запасом часу. У верхньому правому секторі графіка чітко видно, що T_{crit} значно більший за порогове значення (понад 10 умовних одиниць часу), що дає системі простір для адаптації. Натомість у лівому нижньому секторі при високому значенні *SIRI* та малому значенні *M* система входить у зону критичної нестабільності, що вимагає негайної активації протоколів реагування.

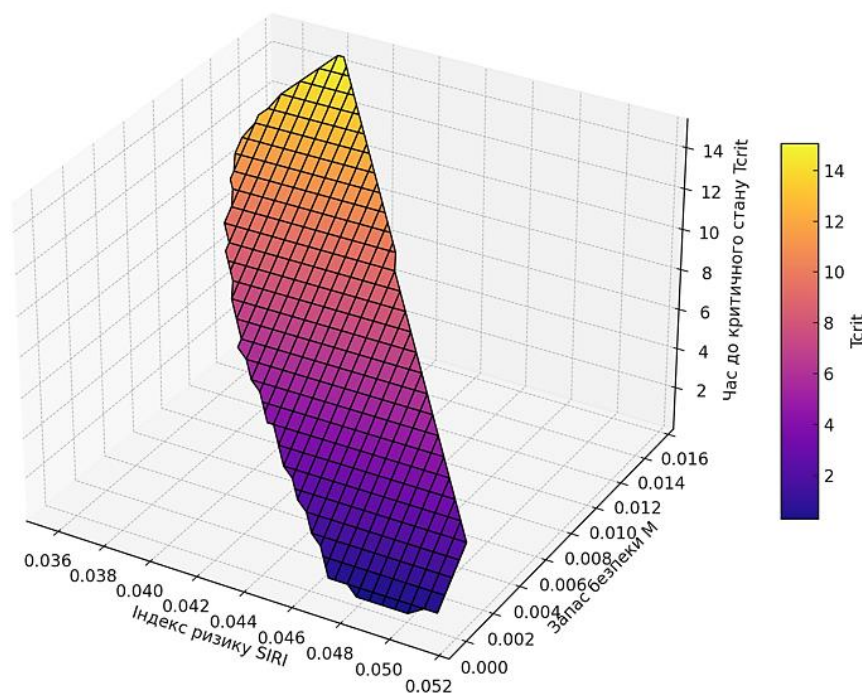


Рис. 4 – Залежність T_{crit} відносно *SIRI* та *M* за основними сценаріями

З аналізу графіка видно, що найбільше значення прогнозованого часу до критичного стану (T_{crit}) досягається при поєднанні низького ризику *SIRI* та високого запасу безпеки *M*. Такі сценарії, як наприклад, «Втрати живлення» або «Критичне навантаження» свідчать про ефективну реакцію системи на потенційну загрозу. Навпаки, сценарії «Інтенсивне маневрування» та «Комбінований вплив» демонструють зниження запасу часу та зростання ризику, що потребує активації відповідних протоколів реагування. Також наочно продемонстровано, як взаємодія трьох параметрів дозволяє не лише оцінити поточний стан судна, а й передбачити момент, коли система потребуватиме переходу до безпечного режиму.

Проведене моделювання підтвердило адаптивність запропонованої моделі до різних сценаріїв

експлуатації. Інтеграція параметрів деградації, зміни ризику та обчислення запасу безпеки дозволяє не лише оцінювати поточний стан, а й робити прогноз ситуацій наближення до критичного рівня. Представлені результати демонструють практичну цінність моделі для реального застосування в системах управління безпекою суден із різним рівнем автоматизації.

Прогнозування індексу ризику для раннього виявлення критичних станів.

У рамках дослідження розроблена методика короткотермінового прогнозування індексу експлуатаційного ризику судна (*SIRI*) на основі часових рядів. Такий підхід дозволяє виявляти небезпечні тренди ще до досягнення критичних значень, що є ключовим для своєчасного реагування в умовах змінного технічного стану або морехідного стану судна та зовнішнього

середовища. Для демонстрації можливостей прогнозу обрано два сценарії: «Комбінований вплив» та «Інтенсивне маневрування», які раніше ідентифіковано як зони підвищеного ризику.

Часові ряди формувались як симульовані послідовності з реалістичною динамікою зміни $SIRI$, характерною для кожного сценарію. Надалі на основі аналітичного наближення тренду виконано прогноз на 10 часових кроків уперед. Так, комбінований вплив, де ризик зростає поступово, прогноз показує тенденцію до наближення до критичного рівня (0.05), але ще в межах допустимого, а у випадку інтенсивного маневрування тренд більш різкий, адже прогнозований $SIRI$ може вийти за межі безпечного значення вже через кілька кроків, що сигналізує про необхідність попереджувальних заходів.

Аналіз графіків показує, що сценарій «Комбінований вплив» демонструє поступове наближення до критичного рівня ризику (0.05), однак запас часу до небезпечного стану дозволяє заздалегідь ініціювати компенсаторні дії. Натомість у сценарії «Інтенсивне маневрування» спостерігається стрімкий ріст індексу $SIRI$, і

прогнозоване перевищення порогу безпеки відбувається вже в перших кроках прогнозу.

Таким чином, навіть проста модель тренду дозволяє сформувати основу для превентивного реагування, що є особливо актуальним для автоматизованих систем навігації та безпеки, а її подальше удосконалення може бути реалізоване через застосування нейромережових методів (LSTM) або інтеграцію з реальними сенсорними потоками та адаптацію до конкретних типів суден.

Автоматизоване прийняття рішень на основі прогнозу ризику.

Для забезпечення оперативного реагування системи суднової безпеки запропоновано алгоритм прийняття рішень, який базується на прогнозованому значенні індексу ризику $SIRI_{t+\Delta t}$, а також оцінці часу до досягнення критичного рівня T_{crit} . Залежно від поєднання цих двох параметрів система може ініціювати різні типи реакцій, від превентивного контролю до повної активації аварійного режиму, що узагальнено в Таблиці 2.

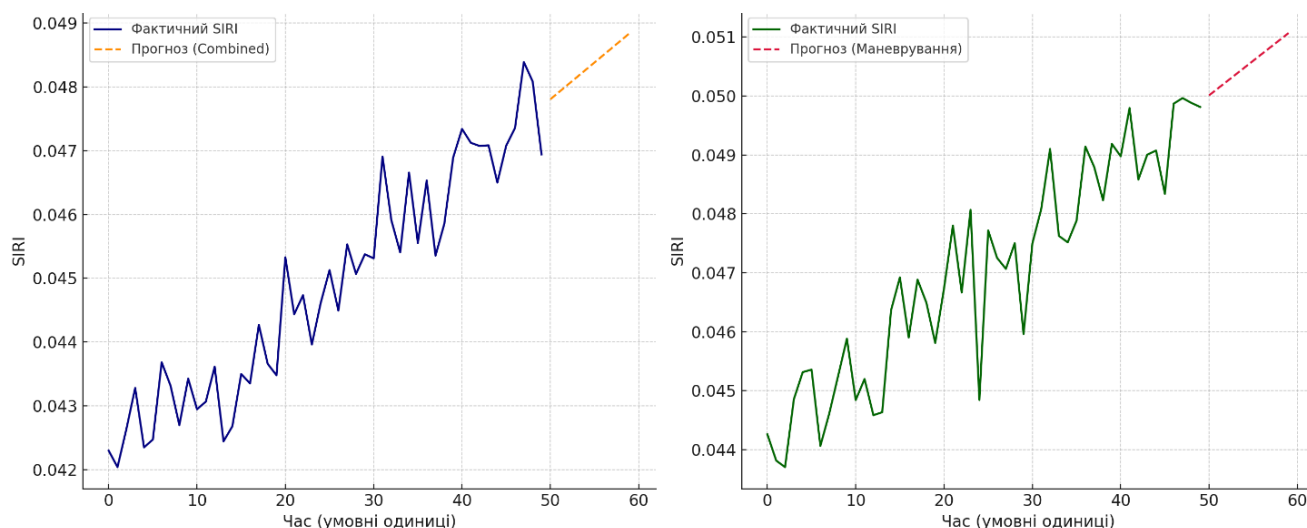
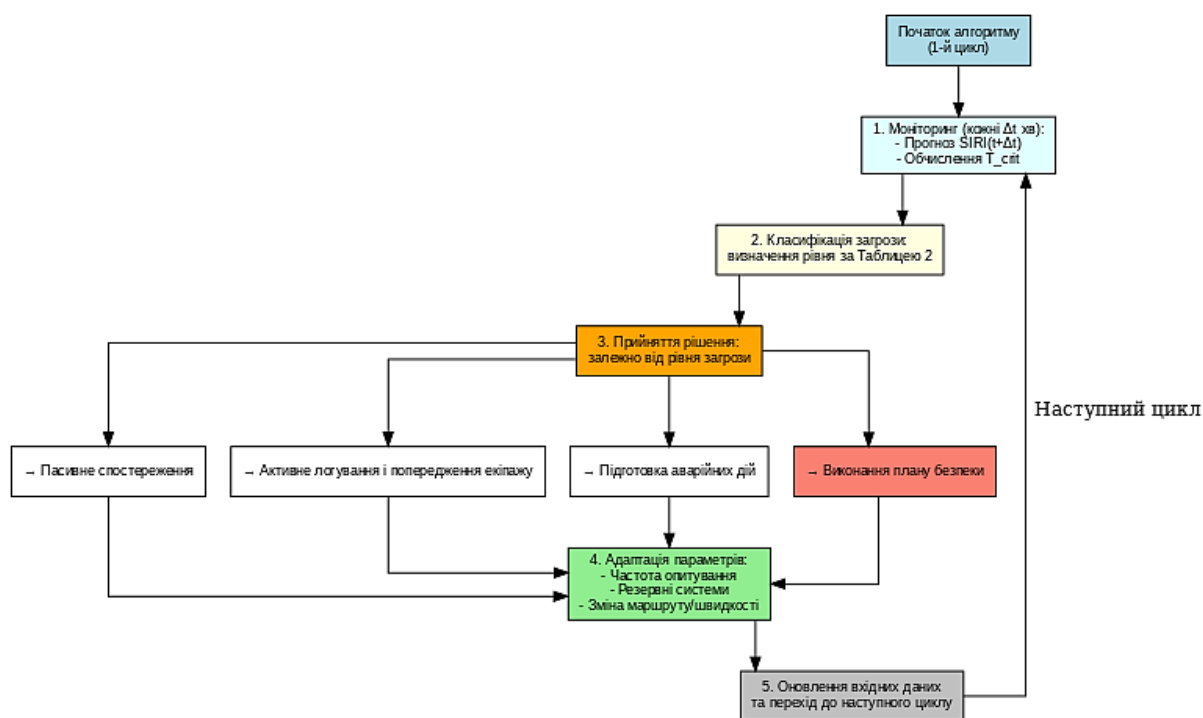


Рис. 5 – Прогноз $SIRI$ для сценаріїв «Комбінований вплив» та «Інтенсивне маневрування»

Таблиця 2

Логіка прийняття рішень системою управління безпекою на основі прогнозу

№	Прогнозований $SIRI$	Прогнозований T_{crit} , хв	Рівень загрози	Автоматизовані дії системи
1	< 0.045	> 30	Низький	Моніторинг, записи подій
2	0.045–0.048	15–30	Помірний	Попередження екіпажу, діагностика
3	0.048–0.050	5–15	Високий	Підготовка до переключення систем
4	> 0.050	< 5	Критичний	Активація протоколу аварійного реагування

Рис. 6 – Алгоритм адаптивного контролю суднової безпеки на основі прогнозованих показників $SIRS$ та T_{crit}

Таким чином, прогнозоване значення індексу $SIRS$ дозволяє класифікувати рівень ризику, а прогнозований запас часу T_{crit} визначити терміновість реагування. Автоматизована система може не лише видавати попередження, а й адаптувати конфігурацію бортових систем, активувати резерви, змінювати маршрут або обмежувати навігаційні маневри залежно від ступеня небезпеки.

Інтеграція прогнозних моделей у систему безпеки експлуатації суден дозволяє реалізувати не лише оцінку поточного стану, а й проактивне керування. На рис. 6 представлено структуровану блок-схему роботи адаптивного контролера, що функціонує за принципом циклічного аналізу параметрів ризику та динамічного реагування. Алгоритм побудовано як послідовність із п'яти основних кроків, кожен з яких адаптується до змін зовнішнього середовища та внутрішніх характеристик судна.

Алгоритм складається з наступних основних етапів:

1. Моніторинг, де у кожному циклі (Δt) виконується прогнозування індексу ризику $SIRS_{t+\Delta t}$ та обчислення прогнозованого часу до критичного стану T_{crit} ;
2. Класифікація загрози, на підставі даних з Таблиці 2 визначається рівень загрози, що активує відповідний шлях реагування;
3. Прийняття рішення, де визначається тип реагування, від пасивного спостереження до активації плану захисту;

4. Виконання дій, де реалізуються відповідні сценарії зміна параметрів, попередження екіпажу, активація дубльованих систем, переключення маршруту;

5. Циклічне оновлення, коли система переходить до наступного циклу з оновленими даними, забезпечуючи динамічну адаптацію.

Таким чином, представлений алгоритм забезпечує замкнуте керування безпекою судна в умовах невизначеності, дозволяючи як уникнути ризиків, так і зменшити наслідки при настанні небезпечних подій. Адаптація логіки до різних типів суден та умов експлуатації відкриває перспективи впровадження в системи автономного судноводіння.

Висновки

У даному дослідженні розроблено та верифіковано інтегровану модель оцінки експлуатаційної безпеки морського судна, яка поєднує математичне моделювання, сценарну симуляцію, адаптивний контроль і прогноз ризику в режимі реального часу. Запропонована модель враховує технічний стан підсистем, ефективність бар'єрів безпеки, зовнішні ризики та часову динаміку деградації, що дозволяє підвищити точність оцінки загроз і ефективність прийняття рішень у змінному середовищі.

Моделювання типових сценаріїв експлуатації підтвердило здатність системи виявляти критичні стани на ранніх етапах, адаптивно реагувати на зміну параметрів та забезпечувати обґрунтовану діагностику ситуацій. Побудовані індикатори індекс ризику, запас

безпеки та прогнозований час до критичного стану забезпечують інформативну основу для інтеграції в системи управління судновою безпекою. Алгоритм прогнозування ризику та адаптивного реагування дозволяє своєчасно активувати протоколи захисту та оптимізувати навігаційні стратегії. Практична цінність моделі підтверджена результатами симуляції, що охоплюють як нормальні, так і стресові режими функціонування судна. Подальший розвиток моделі можливий через інтеграцію сенсорних потоків даних, машинного навчання (зокрема LSTM) та персоналізацію для різних типів суден.

Перелік використаних джерел

- [1] Zhang M., Kujala P., Hirdaris S. A machine learning method for the evaluation of ship grounding risk in real operational conditions. *Reliability Engineering & System Safety*. 2022. Vol. 226. Article 108697. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ress.2022.108697>.
- [2] A hybrid deep learning method for the real-time prediction of collision damage consequences in operational conditions / M. Zhang et al. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 2025. Vol. 145. Article 110158. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2025.110158>.
- [3] A machine learning method for the prediction of ship motion trajectories in real operational conditions / M. Zhang et al. *Ocean Engineering*. 2023. Vol. 283. Article 114905. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.114905>.
- [4] Deng W., Ma X., Qiao W. A novel methodology to quantify the impact of safety barriers on maritime operational risk based on a probabilistic network. *Reliability Engineering & System Safety*. 2024. Vol. 243. Article 109884. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ress.2023.109884>.
- [5] Deng W., Ma X., Qiao W. Resilience-oriented safety barrier performance assessment in maritime operational risk management. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 2025. Vol. 139. Article 104581. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trd.2024.104581>.
- [6] Bulian G., Francescutto A. Level 1 vulnerability criterion for the dead ship condition: A practical methodology for embedding operational limitations. *Ocean Engineering*. 2023. Vol. 272. Article 113868. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.113868>.
- [7] Mauro F., Vassalos D. The effect of the operational environment on the survivability of passenger ships. *Ocean Engineering*. 2023. Vol. 281. Article 114786. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.114786>.
- [8] Evaluation of ship operational effect based on long-term encountered sea states using wave hindcast combined with storm avoidance model / R. Miratsu et al. *Marine Structures*. 2022. Vol. 86. Article 103293. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.marstruc.2022.103293>.
- [9] Systematic analysis and optimization of operational delay factors in port supply chains using a hybrid DEMATEL-OPA-DGRA approach / Karimi N., Javanmardi E., Nadaffard A., Facchini F. *Ocean & Coastal Management*. 2025. Vol. 263. Article 107620. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2025.107620>.
- [10] RouteView 2.0: A Real-time Operational Planning System for Vessels on the Arctic Northeast Passage / A. Wu et al. *Environmental Modelling & Software*. 2025. Vol. 191. Article 106464. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2025.106464>.
- [11] Kurt I., Aymelek M. Operational adaptation of ports with maritime autonomous surface ships. *Transport Policy*. 2023. Vol. 145. Pp. 1-10. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2023.09.023>.
- [12] A framework to assess the operational state of autonomous ships with multi-component degrading systems / X. Zhou et al. *Ocean Engineering*. 2025. Vol. 327. Article 121000. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2025.121000>.
- [13] Internet of things-driven approach integrated with explainable machine learning models for ship fuel consumption prediction / V.N. Nguyen et al. *Alexandria Engineering Journal*. 2025. Vol. 118. Pp. 664-680. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aej.2025.01.067>.
- [14] Ship voyage optimization based on fuel consumption under various operational conditions / Sang Y., Ding Y., Xu J., Sui C. *Fuel*. 2023. Vol. 352. Article 129086. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.129086>.
- [15] Data-driven ship typical operational conditions: A benchmark tool for assessing ship emissions / A. Fan et al. *Journal of Cleaner Production*. 2024. Vol. 483. Article 144252. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.144252>.
- [16] Modeling and operational analysis of ship integrated energy system considering partial-load characteristics of equipment and transferable loads / X. Jiang et al. *Sustainable Energy, Grids and Networks*. 2025. Vol. 42. Article 101651. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.segan.2025.101651>.
- [17] Predicting human reliability for emergency fire pump operational process on tanker ships utilising fuzzy Bayesian Network CREAM modelling / Aydin M., Sezer S.I., Arici S.S., Akyuz E. *Ocean Engineering*. 2024. Vol. 314. Article 119717. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.119717>.
- [18] Russell D.W., Lance R., Rosopa P.J. Operational safety risk modeling in a naval organization. *Journal of Safety Research*. 2025. Vol. 93. Pp. 274-281. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jsr.2025.02.025>.
- [19] 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*. 2025. Vol. 435. Article 113941. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2025.113941>.

- [20] Integrated approach to assess resonance between basin eigenmodes and moored ship motions with wavelet transform analysis and proposal of operational thresholds / R. Costas et al. *Ocean Engineering*. 2022. Vol. 247. Article 110678. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.110678>.
- [21] Deep Q-network and knowledge jointly-driven ship operational efficiency optimization in a seaport / Guo W., Zhang X., Ge Y., Du Y. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*. 2025. Vol. 197. Article 104046. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tre.2025.104046>.
- [22] 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>.
- [23] Мельник О.М., Бичковський Ю.В. Врахування фактору стресу у системі забезпечення безпеки мореплавства. *Вчені записки ТНУ 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>.
- [24] Огляд та перспективи використання сучасних систем курсовказання на морських судах для забезпечення навігаційної безпеки / Мельник О.М., Щербина О.В., Корякін К.С., Бурлаченко Д.А. *Наукові вісті Дніпровського університету*. 2021. № 21. С. 1-8. DOI: <https://doi.org/10.33216/2222-3428-2021-21-13>.
- [25] Актуальні проблеми морської безпеки та сучасні шляхи забезпечення охорони судна / О.М. Мельник та ін. *Комуніальне господарство міст*. 2021. № 6(166). С. 204-210. DOI: <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2021-6-166-204-210>.

INTEGRATED MODEL OF ASSESSMENT AND ADAPTIVE MANAGEMENT OF OPERATIONAL SAFETY OF A SEA VESSEL IN A DYNAMIC ENVIRONMENT

Nykytyuk P.

senior lecturer, Odessa National Maritime University, Odessa, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5905-3807>, e-mail: gelaevnyk@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

The article proposes an integrated model for assessing and adaptive management of the operational safety of a ship, which takes into account the temporal dynamics of risk, the technical condition of subsystems, the effectiveness of safety barriers and the impact of the external environment. The model is based on a probabilistic approach and includes generalized safety indicators: integrated risk index, safety margin, predicted time to critical condition, and system stability index. The developed algorithm provides for consistent monitoring of parameters, risk assessment in ship subsystems, modeling of barrier degradation, and dynamic aggregation of the overall risk. The verification was carried out on the basis of eight scenarios: from basic to stressful situations (power loss, combined impact, intensive maneuvering, etc.). The model features a combination of mathematical modeling and algorithmic response logic, including protection activation conditions and real-time adaptation of parameters. The use of time series and the LSTM model for risk prediction ensures proactive threat detection and decision-making before critical situations occur. The proposed system can be integrated into intelligent safety management platforms, in particular in autonomous or semi-autonomous shipping. The model has a modular structure, which ensures its flexibility and scalability for different types of vessels. Due to the use of weighting factors for the criticality of subsystems, it is possible to adapt the assessment logic to specific ship architectures and operating modes. Particular attention is paid to verifying the results based on simulated scenarios that demonstrate the dependence of the risk index and safety margin on the impact of certain factors, which allows not only post facto analysis but also the active development of protective strategies, which is relevant in the context of the transition to intelligent control systems in maritime transport. The practical value of the model lies in its ability not only to assess the current level of safety, but also to formulate recommendations for changing the speed, route, or mode of loading of the vessel. This approach ensures proactive safety management in conditions of high uncertainty and multifactorial threats.

Keywords: maritime transport, operational safety of a vessel, decision support, integrated risk index, technical condition, safety margin, time modeling, barrier degradation, adaptive control, LSTM prediction, response algorithm, critical time, navigation process, autonomous navigation, scenario modeling, risk-based logic.

References

- [1] M. Zhang, P. Kujala, and S. Hirdaris, «A machine learning method for the evaluation of ship grounding risk in real operational conditions», *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 226, article 108697, 2022. doi: [10.1016/j.ress.2022.108697](https://doi.org/10.1016/j.ress.2022.108697).
- [2] M. Zhang, H. Wang, F. Conti, T. Manderbacka, H. Remes, and S. Hirdaris, «A hybrid deep learning

- method for the real-time prediction of collision damage consequences in operational conditions», *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 145, article 110158, 2025. doi: **10.1016/j.engappai.2025.110158**.
- [3] M. Zhang, P. Kujala, M. Musharraf, J. Zhang, and S. Hirdaris, «A machine learning method for the prediction of ship motion trajectories in real operational conditions», *Ocean Engineering*, vol. 283, article 114905, 2023. doi: **10.1016/j.oceaneng.2023.114905**.
- [4] W. Deng, X. Ma, and W. Qiao, «A novel methodology to quantify the impact of safety barriers on maritime operational risk based on a probabilistic network», *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 243, article 109884, 2024. doi: **10.1016/j.ress.2023.109884**.
- [5] W. Deng, X. Ma, and W. Qiao, «Resilience-oriented safety barrier performance assessment in maritime operational risk management», *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 139, article 104581, 2025. doi: **10.1016/j.trd.2024.104581**.
- [6] G. Bulian, and A. Francescutto, «Level 1 vulnerability criterion for the dead ship condition: A practical methodology for embedding operational limitations», *Ocean Engineering*, vol. 272, article 113868, 2023. doi: **10.1016/j.oceaneng.2023.113868**.
- [7] F. Mauro, and D. Vassalos, «The effect of the operational environment on the survivability of passenger ships», *Ocean Engineering*, vol. 281, article 114786, 2023. doi: **10.1016/j.oceaneng.2023.114786**.
- [8] R. Miratsu, K. Sasmal, T. Kodaira, T. Fukui, and T. Zhu, T. Waseda, «Evaluation of ship operational effect based on long-term encountered sea states using wave hindcast combined with storm avoidance model», *Marine Structures*, vol. 86, article 103293, 2022. doi: **10.1016/j.marstruc.2022.103293**.
- [9] N. Karimi, E. Javanmardi, A. Nadaffard, and F. Facchini, «Systematic analysis and optimization of operational delay factors in port supply chains using a hybrid DEMATEL-OPA-DGRA approach», *Ocean & Coastal Management*, vol. 263, article 107620, 2025. doi: **10.1016/j.ocecoaman.2025.107620**.
- [10] A. Wu et al. «RouteView 2.0: A Real-time Operational Planning System for Vessels on the Arctic Northeast Passage», *Environmental Modelling & Software*, vol. 191, article 106464, 2025. doi: **10.1016/j.envsoft.2025.106464**.
- [11] I. Kurt, and M. Aymelek, «Operational adaptation of ports with maritime autonomous surface ships», *Transport Policy*, vol. 145, pp. 1-10, 2023. doi: **10.1016/j.tranpol.2023.09.023**.
- [12] X. Zhou et al., «A framework to assess the operational state of autonomous ships with multi-component degrading systems», *Ocean Engineering*, vol. 327, article 121000, 2025. doi: **10.1016/j.oceaneng.2025.121000**.
- [13] V. Nguyen, N. Chung, G. Balaji, K. Rudzki, and A. Hoang, «Internet of things-driven approach integrated with explainable machine learning models for ship fuel consumption prediction», al. *Alexandria Engineering Journal*, vol. 118, pp. 664-680, 2025. doi: **10.1016/j.aej.2025.01.067**.
- [14] Y. Sang, Y. Ding, J. Xu, and C. Sui, «Ship voyage optimization based on fuel consumption under various operational conditions», *Fuel*, vol. 352, article 129086, 2023. doi: **10.1016/j.fuel.2023.129086**.
- [15] A. Fan et al., «Data-driven ship typical operational conditions: A benchmark tool for assessing ship emissions», *Journal of Cleaner Production*, vol. 483, article 144252, 2024. doi: **10.1016/j.jclepro.2024.144252**.
- [16] X. Jiang, Z. Xu, Y. Xie, H. Wang, H. Yuan, and J. Qin, «Modeling and operational analysis of ship integrated energy system considering partial-load characteristics of equipment and transferable loads», *Sustainable Energy, Grids and Networks*, vol. 42, pp. 101651, 2025. doi: **10.1016/j.segan.2025.101651**.
- [17] M. Aydin, S.I. Sezer, S.S. Arici, and E. Akyuz, «Predicting human reliability for emergency fire pump operational process on tanker ships utilising fuzzy Bayesian Network CREAM modelling», *Ocean Engineering*, vol. 314, article 119717, 2024. doi: **10.1016/j.oceaneng.2024.119717**.
- [18] D.W. Russell, R. Lance, and P.J. Rosopa, «Operational safety risk modeling in a naval organization», *Journal of Safety Research*, vol. 93, pp. 274-281, 2025. doi: **10.1016/j.jsr.2025.02.025**.
- [19] H. Mochizuki, «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*, vol. 435, article 113941, 2025. doi: **10.1016/j.nuceng-des.2025.113941**.
- [20] R. Costas, A. Figuero, E. Peña, J. Sande, and P. Rosa-Santos, «Integrated approach to assess resonance between basin eigenmodes and moored ship motions with wavelet transform analysis and proposal of operational thresholds», *Ocean Engineering*, vol. 247, article 110678. doi: **10.1016/j.oceaneng.2022.110678**.
- [21] W. Guo, X. Zhang, Y. Ge, and Y. Du, «Deep Q-network and knowledge jointly-driven ship operational efficiency optimization in a seaport», *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, vol. 197, article 104046, 2025. doi: **10.1016/j.tre.2025.104046**.
- [22] O.M. Melnyk, Yu.V. Bychkovsky, «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*, № 2(9), pp. 37-46, 2021. doi: **10.33082/td.2021.2-9.03**. (Ukr.)
- [23] O.M. Melnyk, and Yu.V. Bychkovskiy, «Vrakhuvannia faktorov stresu u systemi zabezpechennia bezpeky moreplavstva» [«Stress factor in the system of the shipping safety»], *Vcheni zapysky TNU imeni V.I. Vernadskoho. Seriya: 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**. (Ukr.)

- [24] O. Melnyk, O. V. Shcherbina, K. Koryakin, D. A. Burlachenko, «Ohliad ta perspektyvy vykorystannia suchasnykh system kursovkazannia na morskykh sudnakh dlia zabezpechennia navihatsiinoi bezpeky» [«Overview and prospects for the use of modern course guidance systems on seagoing vessels to ensure navigational safety»], *Naukovi visti dalivskoho universytetu*, № 21, pp. 1-8, 2021. doi: **10.33216/2222-3428-2021-21-13**. (Ukr.)

- [25] O. Melnyk, S. Onyshchenko, O. Lohinov, V. Okulov, and I. Pulyaev, «Aktualni problemy morskoi bezpeky ta suchasni shliakhy zabezpechennia okhorony sudna» [«Current problems of maritime safety and modern ways of ensuring ship security»], *Komunalne hospodarstvo mist – Municipal economy of cities*, № 6(166), pp. 204-210, 2021. doi: **10.33042/2522-1809-2021-6-166-204-210**. (Ukr.)

Стаття надійшла 15.04.2025

Стаття прийнята 28.04.2025

Стаття опублікована 30.06.2025

Цитуйте цю статтю як: Никитюк П.В., Мельник О.М. Інтегрована модель оцінки та адаптивного управління експлуатаційною безпекою морського судна в умовах динамічного середовища. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2025. Вип. 50. С. 235-246. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.50.2025.336409>.