

УДК 656.61:004.9:629.5

<https://doi.org/10.31713/vt220266>**Щенявський Г. С.** [1, ORCID: 0000-0001-7803-978X],

старший викладач кафедри судноводіння і морської безпеки,

Мельник О. М., [1, ORCID: 0000-0001-9228-8459],

д.т.н., професор, завідувач кафедри судноводіння і морської безпеки,

¹ *Одеський національний морський університет*

СИСТЕМИ СМАРТ-МОНІТОРИНГУ В ІНФОРМАЦІЙНО-НАВІГАЦІЙНИХ КОМПЛЕКСАХ СУЧАСНОГО СУДНА

На сучасному етапі розвитку морської галузі судно функціонує як складний вузол агрегації великих масивів даних. Впровадження концепції e-navigation та еволюція інтегрованих місткових систем (IBS) зумовлюють нагальну потребу в переході від пасивного відображення навігаційної інформації до її глибокого інтелектуального аналізу. Традиційні підходи до моніторингу часто обмежуються лише візуалізацією потоків даних, що в умовах інтенсивного судноплавства підвищує когнітивне навантаження на судноводія та створює передумови для помилок, зумовлених людським чинником. У роботі проведено системний аналіз основних джерел навігаційної інформації, включаючи автоматичні ідентифікаційні системи (AIS), глобальні супутникові системи (GNSS), суднові радіолокаційні станції (РЛС) та електронні картографічні навігаційні системи (ECDIS). Виявлено, що ефективність їхнього прямого використання обмежена фрагментарністю даних, наявністю апаратних похибок та відсутністю єдиного контуру інтерпретації ситуаційної обстановки. Для вирішення цих суперечностей обґрунтовано концепцію смарт-моніторингу як інтегрованого процесу обробки, фільтрації та аналітичного оцінювання параметрів руху в реальному часі. Запропоновано формалізовану архітектуру системи смарт-моніторингу, що базується на каскадному застосуванні математичних операторів інтеграції даних. В основі моделі лежить алгоритм оцінки параметрів відносного руху суден, що використовує динамічні показники найкоротшої дистанції зближення (CPA) та часу до неї (TCPA) для точної ідентифікації рівня навігаційної загрози. Ключовим науковим результатом є

розробка функції ризику та синтез інтегрального індикатора безпеки SRI (Safety Risk Index), показник що дозволяє здійснювати кількісну оцінку поточної ситуації, трансформуючи розрізнені технічні параметри у рекомендації для прийняття управлінських рішень. Запропонований підхід забезпечує перехід від реактивного спостереження до проактивного управління безпекою, де система здатна прогнозувати розвиток небезпечних сценаріїв ще до моменту їхньої критичної фази.

Ключові слова: морський транспорт, безпека судноплавства, смарт-моніторинг, навігаційні системи судна, AIS, GNSS, ECDIS, радіолокація, CPA, TCPA, оцінка ризику, індекс безпеки, інтегровані мостикові системи, e-navigation.

Актуальність. Розвиток інтегрованих інформаційних систем зумовив перехід від класичного спостереження до інтелектуального смарт-моніторингу, де судно розглядається як багатокomпонентна кіберфізична структура. Синтез даних AIS, ECDIS та радіолокаційних комплексів дозволяє сформувати цілісний ситуаційний простір, проте водночас вимагає нових підходів до фільтрації невизначеності та управління великими масивами даних. В сучасному суднопластві традиційний інструментарій виявляється недостатнім, що актуалізує потребу в створенні інтелектуальних рішень, здатних до адаптивного прогнозування та динамічної оцінки безпеки.

Постановка проблеми. Існуючі навігаційні засоби характеризуються високим рівнем фрагментарності даних, слабким аналітичним апаратом та критичною залежністю від суб'єктивних рішень оператора. Наявність інформаційних шумів у поєднанні з обмеженими можливостями прогностичного моделювання ризиків у реальному часі створює системні бар'єри для оперативної оцінки обстановки, що веде до зростання аварійності на морському транспорті.

Огляд літератури. Сучасні інформаційно-навігаційні комплекси судна еволюціонують від ізольованих систем до інтегрованого smart-monitoring-середовища, що забезпечують безперервний контроль навігаційних, технічних і операційних параметрів у реальному часі. Базою такої інтеграції є концепція Integrated Bridge Systems (IBS), яка визначає стандартизовані вимоги до об'єднання навігаційних систем, сенсорів і засобів підтримки прийняття рішень [1]. Подальший розвиток цієї ідеї реалізується у переході до marine bridge domain, де інформаційні потоки розглядаються як єдина

обчислювальна екосистема з можливістю інтелектуального аналізу даних [2].

Ключовим напрямом розвитку є впровадження e-navigation, що спрямована на підвищення ситуаційної обізнаності, автоматизацію обробки інформації та зниження когнітивного навантаження на судноводія [4]–[6]. Дослідження показують, що ефективність таких систем залежить від якості інтеграції даних, надійності комунікацій та здатності систем до адаптації в умовах невизначеності [7], [8]. У такому контексті концепція smart-monitoring трансформується у інструмент системної агрегації, селективної фільтрації та змістовної інтерпретації великих обсягів навігаційної інформації, що створює надійний аналітичний базис для оперативного прогнозування потенційних ризиків та формування багаторівневої підтримки прийняття рішень судноводієм. При цьому стратегічне значення мають передові методи аналізу руху суден та патернів поведінки суден, що дозволяють виявляти аномалії та критичні зближення в умовах складної навігаційної обстановки.

Інтеграція smart-monitoring із технічними характеристиками судна також є критичною. Дослідження показують, що параметри корпусу, рушійних систем і гідродинамічні впливи безпосередньо визначають поведінку судна та повинні враховуватися у системах моніторингу й оцінювання ризику [3], [9], [14]. Для автономних і безекіпажних платформ додатковим фактором стає надійність передачі даних і стійкість до перешкод, що забезпечується сучасними гібридними системами комунікації [13].

Важливу роль відіграють методи аналізу трафіку та поведінки суден. Зокрема, використання AIS/ECDIS даних дозволяє формувати профілі руху, виявляти аномалії та оцінювати ризики зіткнення чи небезпечних маневрів [10], [11]. Подальший розвиток цих підходів пов'язаний із застосуванням машинного навчання, семантичного аналізу та фрактальних методів, що забезпечують глибше розуміння динаміки судна і складних навігаційних процесів [12], [15].

Таким чином, системи smart-monitoring у сучасних інформаційно-навігаційних комплексах формуються як інтегровані інтелектуальні платформи, що поєднують сенсорні дані, аналітичні моделі та алгоритми підтримки рішень і їх розвиток спрямований на перехід до проактивного управління навігаційною безпекою, де ключову роль відіграють адаптивність, прогнозування та комплексний аналіз стану судна і середовища.

Мета дослідження. Метою роботи є розробка формалізованого підходу до побудови системи смарт-моніторингу навігаційної обстановки на основі інтеграції даних та методів математичного моделювання.

Виклад основного матеріалу.

Аналіз навігаційного інструментарію та декомпозиція задачі дослідження

Функціональний аналіз сучасних бортових інформаційно-навігаційних комплексів

На сучасному етапі судно функціонує як складний вузол агрегації даних, де ключову роль відіграють інтегровані системи моніторингу (IBS), що акумулюють потоки від AIS (Автоматична ідентифікаційна система), GNSS (Глобальна навігаційна супутникова система), Radar або судові радіолокаційні станції (РЛС) та ECDIS (Електронна картографічна навігаційна інформаційна система).

Так система AIS виступає критичним каналом міжнавігаційного обміну динамічними параметрами (курс, швидкість, вектор руху). Проте її ефективність лімітована дискретністю передачі даних та вразливістю до некоректного ручного введення інформації. GNSS-сенсори забезпечують прецизійне позиціонування, проте їхня надійність є стохастичною через ризики радіочастотних завад (jamming) та маніпуляцій із сигналом (spoofing).

Що стосується радіолокаційних засобів (РЛС) то вони залишаються єдиним джерелом незалежної верифікації надводної обстановки, хоча їхня робота ускладнюється атмосферними завадами та обмеженою роздільною здатністю при детектуванні малорозмірних цілей. У зазначеній ієрархії система ECDIS виконує функцію консолідованого графічного інтерфейсу відображення навігаційної інформації. Водночас її аналітичні можливості обмежуються переважно візуалізацією даних і не передбачають інтелектуальної інтерпретації багаторівневих загроз або інтегрованого оцінювання ризику в режимі реального часу.

Таким чином, інтегрований місток (IBS) формує єдине інформаційне поле, яке, однак, потребує впровадження методів інтелектуальної фільтрації та синергії даних для подолання існуючих технологічних обмежень [1, 2].

Обґрунтування впровадження інтелектуального смарт-моніторингу

Для подолання критичних обмежень сучасних навігаційних комплексів постає гостра потреба у впровадженні систем смарт-

моніторингу нового покоління. Фундаментальною основою таких рішень є створення єдиного інформаційного простору, що базується на синергетичній конвергенції гетерогенних даних, які надходять від розрізнених суднових сенсорів, що дозволяє нівелювати фрагментарність інформації та забезпечити високу консистентність ситуаційної моделі [3].

У межах такого підходу реалізується перехід до автоматизованого когнітивного аналізу навігаційної обстановки, де система перестає бути пасивним ретранслятором даних і перетворюється на активного аналітика. Завдяки алгоритмам інтелектуального скорингу стає можливим не лише детектування, а й селективна ідентифікація латентних джерел небезпеки та ранжування об'єктів за ступенем їхньої потенційної загрози [4].

Особливе значення має впровадження механізмів прогностичної екстраполяції, які дозволяють моделювати динаміку розвитку ситуації на випередження, що забезпечує превентивне виявлення критичних сценаріїв зближення ще до моменту їхнього переходу в аварійну фазу. Кінцевим етапом функціонування такої системи є надання судноводію релевантної підтримки прийняття рішень у темпі реального часу, що суттєво знижує когнітивне навантаження та нівелює вплив суб'єктивного фактора.

Таким чином, пропонована концепція смарт-моніторингу знаменує собою парадигмальний перехід у безпеці мореплавства: від традиційних пасивних інформаційних комплексів до проактивних інтелектуальних систем управління, здатних адаптивно реагувати на складність та динамізм сучасного навігаційного середовища.

Формальна постановка задачі. Нехай: $X(t)$ - вектор вхідних навігаційних даних; $E(t)$ - стан зовнішнього середовища. Необхідно побудувати систему смарт-моніторингу, яка реалізує відображення:

$$S(t) = F(X(t), E(t)) \quad (1)$$

де: $S(t)$ - оцінка навігаційної ситуації; F - оператор інтелектуальної обробки даних. При цьому система повинна забезпечувати формування керуючих рекомендацій:

$$U(t) = \Phi(S(t)) \quad (2)$$

де: $U(t)$ - множина керуючих дій або рекомендацій судноводію; Φ - оператор прийняття рішень. З урахуванням прогнозування задача розширюється до:

$$S(t + \Delta t) = F_p(X(t), E(t), M) \quad (3)$$

де: F_p - оператор прогнозування; M - математична модель руху об'єктів.

Проведений аналіз показує, що існуючі навігаційні системи не забезпечують достатнього рівня автоматизації аналізу та прогнозування навігаційної обстановки, що обумовлює необхідність розробки систем смарт-моніторингу, які поєднують інтеграцію даних, математичне моделювання та підтримку прийняття рішень.

Формалізація моделі системи смарт-моніторингу

Загальна математична модель

Систему смарт-моніторингу навігаційної обстановки доцільно представити як динамічну систему станів $X(t) \xrightarrow{F_1} \tilde{X}(t) \xrightarrow{F_2} Z(t) \xrightarrow{F_3} S(t) \xrightarrow{F_4} U(t)$, де кожен оператор відповідає окремому етапу обробки інформації.

Після представлення композиційної форми

$$U(t) = F_4 \circ F_3 \circ F_2 \circ F_1(X(t)), \quad (4)$$

доцільно деталізувати покрокову реалізацію кожного етапу перетворення інформації.

На першому етапі виконується попередня обробка вхідних даних. Оператор F_1 здійснює фільтрацію, нормалізацію та усунення шумових компонентів, формуючи узгоджений вектор стану: $\tilde{X}(t) = F_1(X(t))$.

Отриманий вектор $\tilde{X}(t)$ належить простору очищених та структурованих даних і є придатним для подальшої аналітичної інтерпретації.

Другий етап відповідає за формування інформаційних ознак або індикаторів стану середовища. Оператор F_2 виконує трансформацію простору даних у простір характеристик: $Z(t) = F_2(\tilde{X}(t))$. Тут $Z(t)$ інтерпретується як вектор параметрів навігаційної обстановки, що описує суттєві властивості ситуації у стислому представленні.

На третьому етапі здійснюється оцінка ризику або ситуаційної значущості сформованих ознак. Оператор F_3 агрегує параметри $Z(t)$ у показник стану безпеки: $S(t) = F_3(Z(t))$. Функція F_3 може реалізовуватися як зважена сума, нелінійне відображення або ймовірнісна модель, залежно від архітектури системи.

Завершальний етап пов'язаний із формуванням управлінського рішення або керуючого впливу. Оператор F_4 перетворює оцінку стану у конкретну команду або рекомендацію: $U(t) = F_4(S(t))$.

Таким чином, вся система смарт-моніторингу описується як композиція операторів, що послідовно відображають простір первинних даних у простір керуючих впливів. Така формалізація дозволяє чітко розмежувати функціональні модулі системи та забезпечує можливість незалежної верифікації кожного з них.

Отже вхідний вектор системи визначається як

$$X(t) = \{x_i(t)\}_{i=1}^n \quad (5)$$

де кожен елемент включає: координати судна (x, y) швидкість V , курс ψ , параметри цілей (x_j, y_j, V_j, ψ_j) та зовнішні фактори $E(t)$.

Рух судна описується кінематичними рівняннями:

$$\begin{cases} x(t + \Delta t) = x(t) + V \cos(\psi) \Delta t \\ y(t + \Delta t) = y(t) + V \sin(\psi) \Delta t \end{cases} \quad (6)$$

Аналогічно для цільового судна:

$$\begin{cases} x_j(t + \Delta t) = x_j(t) + V_j \cos(\psi_j) \Delta t \\ y_j(t + \Delta t) = y_j(t) + V_j \sin(\psi_j) \Delta t \end{cases} \quad (7)$$

Введемо відносні координати:

$$\Delta x = x_j - x, \quad \Delta y = y_j - y \quad (8)$$

та відносну швидкість:

$$\vec{V}_r = \begin{pmatrix} V_j \cos \psi_j - V \cos \psi \\ V_j \sin \psi_j - V \sin \psi \end{pmatrix} \quad (9)$$

Це дозволяє перейти до аналізу зближення суден.

Оцінка дистанції між суднами в поточному вигляді буде:

$$D(t) = \sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2} \quad (10)$$

Час найменшого зближення (ТСРА)

$$ТСРА = - \frac{\Delta x \cdot \Delta V_x + \Delta y \cdot \Delta V_y}{\|\vec{V}_r\|^2} \quad (11)$$

Мінімальна дистанція зближення (CRA)

$$CPA = \sqrt{(\Delta x + \Delta V_x \cdot TCPA)^2 + (\Delta y + \Delta V_y \cdot TCPA)^2}. \quad (12)$$

Для формалізації оцінки ризику введемо функцію ризику:

$$R(t) = f(D(t), CPA, TCPA) \quad (13)$$

Наприклад:

$$R(t) = \alpha \frac{1}{D(t)} + \beta \frac{1}{CPA} + \gamma e^{-TCPA}, \quad (14)$$

де: α, β, γ - вагові коефіцієнти

Тоді інтегральна модель смарт-моніторингу в системі підсумково оцінює ситуацію як:

$$S(t) = F(X(t)) = \{D(t), CPA, TCPA, R(t)\}, \quad (15)$$

Вираз (13) може бути еквівалентно поданий у векторній формі, що спрощує подальший аналіз та агрегування показників.

$$S(t) = \begin{bmatrix} D(t) \\ CPA \\ TCPA \\ R(t) \end{bmatrix}. \quad (16)$$

Модель дозволяє формалізувати процес смарт-моніторингу як послідовність математичних перетворень від первинних даних до оцінки ризику зіткнення. Використання параметрів CPA та TCPA забезпечує кількісну оцінку небезпеки, що є основою для побудови інтелектуальних систем підтримки прийняття рішень.

Логічна схема на рисунку 1 відображає послідовність обробки навігаційної інформації від етапу збору даних до формування керуючих рішень. На першому етапі здійснюється фільтрація даних (F_1), що дозволяє зменшити вплив шумів і похибок. Далі виконується інтеграція інформації (F_2) з різних джерел.

На основі інтегрованих даних здійснюється розрахунок ключових навігаційних параметрів (D , $TCPA$, CPA), які використовуються для оцінювання ризику $R(t)$. Завершальним етапом є формування управлінського рішення $U(t)$.

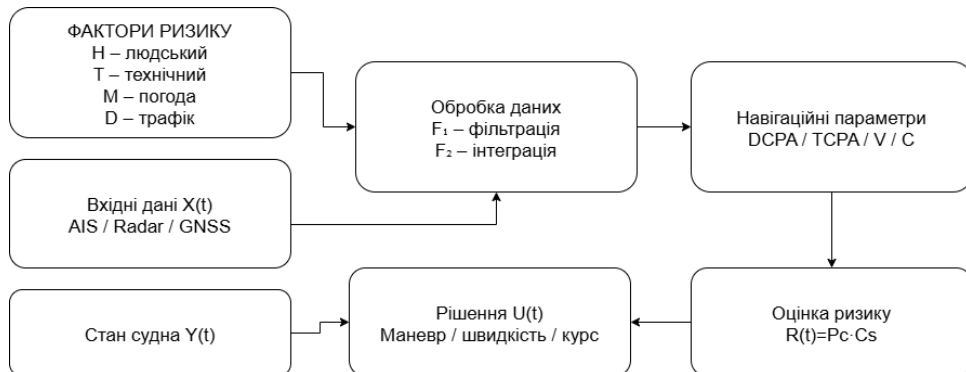


Рис. 1. Процес обробки навігаційної інформації від етапу збору даних до формування рішень

Розробка системи смарт-моніторингу навігаційної обстановки

Загальна архітектура системи

Система смарт-моніторингу призначена для безперервного контролю навігаційної обстановки, аналізу параметрів руху судна і навколишніх об'єктів, а також для формування попереджень і рекомендацій судноводію. Її архітектура будується за модульним принципом і включає блоки збору даних, інтеграції, аналітичної обробки, оцінки ризику та підтримки прийняття рішень.

На першому рівні функціонують джерела первинної інформації, до яких належать AIS, GNSS, радіолокаційні системи, ECDIS, а також бортові сенсори курсу, швидкості та параметрів руху, тобто засоби формують потік неоднорідних даних, що характеризують як власний стан судна, так і зовнішню обстановку.

На другому рівні виконується попередня обробка інформації. Тут здійснюються фільтрація шумів, усунення надлишковості, синхронізація часових міток і приведення даних до єдиного формату. Результатом є узгоджений інформаційний масив, придатний для подальшого аналізу.

Третій рівень реалізує аналітичну функцію системи. Саме тут виконуються розрахунки дистанції до цілей, параметрів CPA (Closest Point of Approach) і TCPA (Time to Closest Point of Approach), визначення відносного руху, а також оцінка рівня ризику. На основі цих розрахунків система виявляє потенційно небезпечні ситуації та визначає ступінь загрози.

На четвертому рівні формується підсистема підтримки прийняття рішень. Вона перетворює результати аналітичної обробки у зрозумілі для судноводія повідомлення: попередження, сигнали тривоги, рекомендації щодо маневрування або зміни режиму руху. Таким чином, система не лише відображає інформацію, а й активно підтримує процес навігаційного управління.

Функціонально система смарт-моніторингу реалізує такий ланцюг перетворення інформації:

$X(t) \rightarrow \tilde{X}(t) \rightarrow Z(t) \rightarrow S(t) \rightarrow R(t) \rightarrow U(t)$, де $X(t)$ - первинні вхідні дані; $\tilde{X}(t)$ - відфільтровані дані; $Z(t)$ - інтегрований стан обстановки; $S(t)$ - оцінка навігаційної ситуації; $R(t)$ - рівень ризику; $U(t)$ - керуючі рекомендації.

Отже, структура системи має послідовний характер, але при цьому працює в режимі замкненого циклу, оскільки кожне нове вимірювання уточнює поточну оцінку стану середовища.

Принцип функціонування системи

Принцип роботи системи полягає в тому, що в реальному часі приймаються дані від усіх доступних навігаційних джерел. Після цього вони проходять етап попередньої обробки, де усуваються похибки і суперечності. Далі система виконує інтеграцію даних і формує цілісну картину навігаційної обстановки.

Наступним етапом є аналітична оцінка. Для кожного виявленого об'єкта визначаються параметри відносного руху, поточна відстань, прогнозований час найменшого зближення та мінімальна дистанція зближення. На основі цих показників система обчислює функцію ризику. Якщо значення ризику перевищує допустимий поріг, система генерує попередження або рекомендацію щодо дій судноводія. Такий підхід дозволяє перейти від простого спостереження до інтелектуального моніторингу з елементами прогнозування.

Перевагою такої структури є те, що вона забезпечує комплексне використання різномірних інформаційних джерел та дозволяє виконувати оцінку навігаційної ситуації не лише за поточним станом, а й з урахуванням прогнозу. Крім того, модульна побудова системи спрощує її розширення, наприклад, шляхом додавання алгоритмів машинного навчання або нових типів сенсорів.

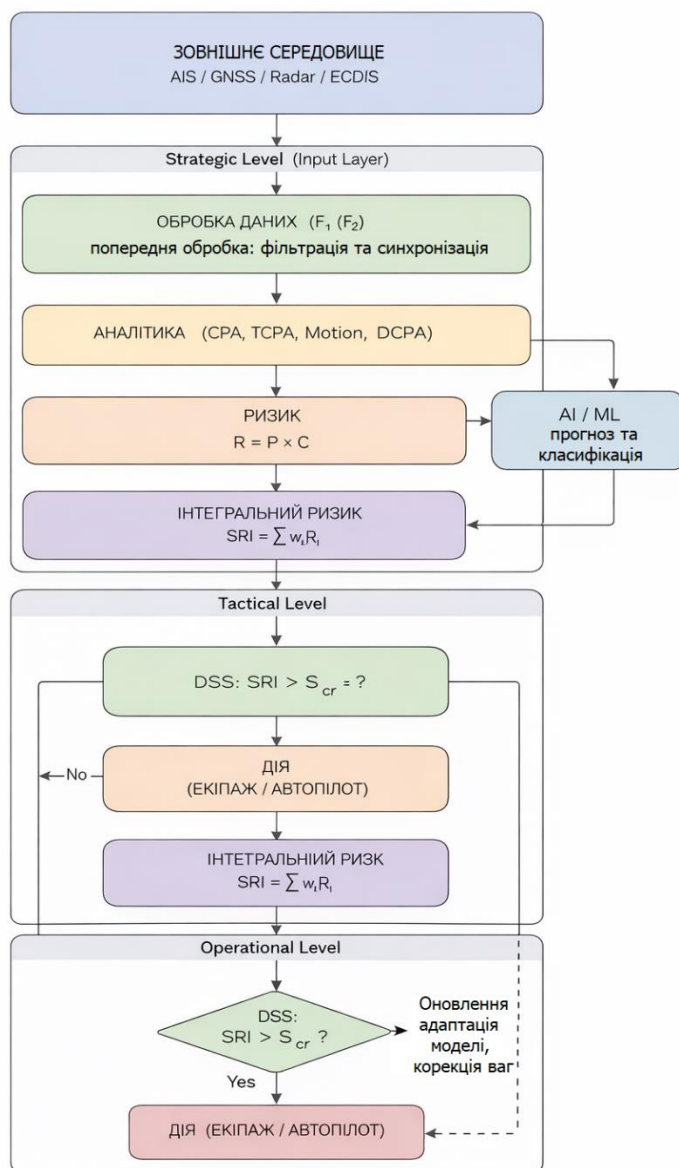


Рис. 2. Структурна схема системи смарт-моніторингу навігаційної обстановки судна

Запропонована архітектура також зменшує інформаційне навантаження на судноводія, оскільки замість великого обсягу сирих даних він отримує вже оброблені результати у вигляді попереджень і рекомендацій.

Отже, розроблена система смарт-моніторингу є багаторівневою інформаційно-аналітичною структурою, яка поєднує збір, інтеграцію, аналіз і прогнозування навігаційної обстановки. Її застосування створює основу для підвищення безпеки судноплавства та ефективності підтримки прийняття рішень у складних умовах руху.

Алгоритм функціонування інтегрованої системи забезпечення безпеки судна реалізує замкнений цикл обробки даних та прийняття рішень. На першому етапі здійснюється збір та попередня обробка даних із сенсорних систем та зовнішнього середовища. Далі виконується інтеграція даних і розрахунок аналітичних показників руху (CPA, TCPA, параметри траєкторії).

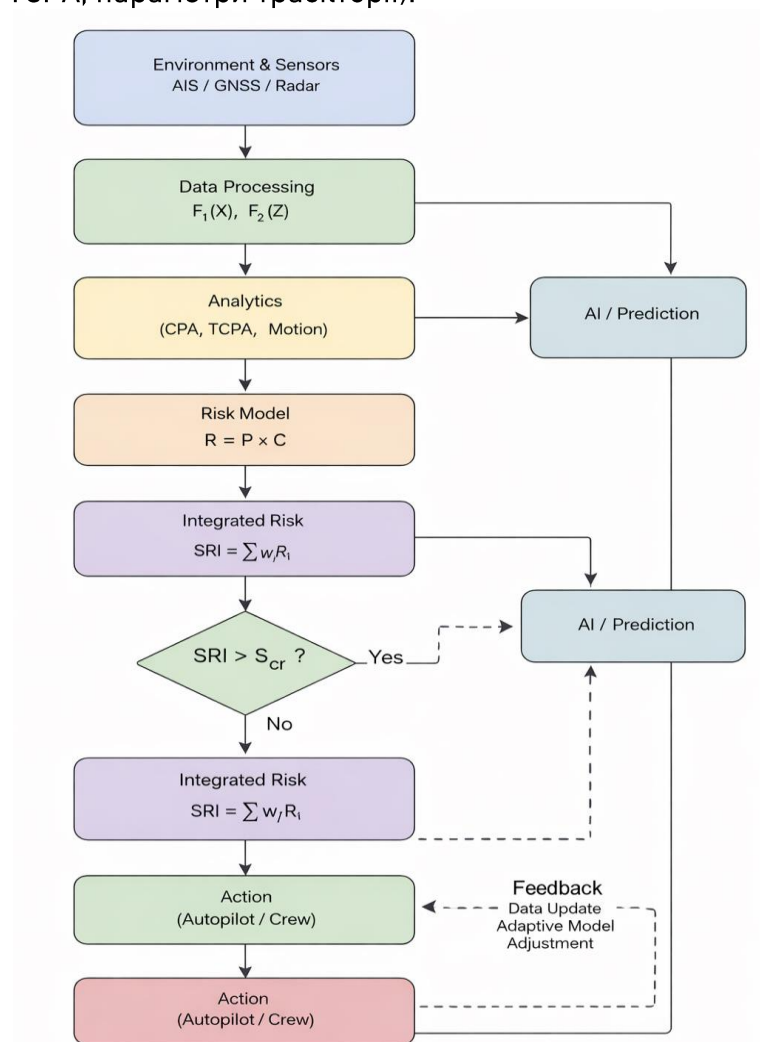


Рис. 3. Алгоритм функціонування інтегрованої системи забезпечення безпеки судна

На основі отриманих параметрів формується оцінка ризику відповідно до співвідношення

$$(R = P \cdot C \cdot \prod_{j=1}^K (1 - B_j(t))), \quad (17)$$

після чого здійснюється інтеграція часткових ризиків у зведений показник SRI (комплексний індекс ризику),

$$SRI = \sum_{i=1}^n w_i R_i,$$

$$SRI > S_{crit} \Rightarrow U(t) \neq 0, \quad (18)$$

де S_{crit} - критичний поріг безпеки.

Паралельно використовуються методи штучного інтелекту для прогнозування розвитку ситуації. Отриманий показник SRI порівнюється з критичним порогом, що визначає необхідність втручання. У разі перевищення порогового значення формується управлінське рішення, яке реалізується через дії судноводія або автоматизовані системи управління.

Результати виконаних дій використовуються як зворотний зв'язок для коригування вхідних даних та параметрів моделі, що забезпечує адаптивність системи та її здатність до функціонування в умовах невизначеності.

Подальші дослідження доцільно спрямувати на інтеграцію методів штучного інтелекту для підвищення точності прогнозування, адаптацію моделей до складних гідрометеорологічних умов та розширення функціоналу систем смарт-моніторингу в рамках концепції e-navigation.

Висновки. У роботі запропоновано формалізовану модель системи смарт-моніторингу, яка базується на послідовному застосуванні операторів обробки інформації, що забезпечують перехід від первинних навігаційних даних до формування керуючих рішень. Розроблено математичний апарат оцінки параметрів відносного руху суден, зокрема дистанції зближення, часу найменшого зближення та мінімальної дистанції. Ключовим результатом є введення функції ризику та інтегрального показника безпеки, який дозволяє здійснювати кількісну оцінку рівня навігаційної небезпеки та трансформувати множину технічних параметрів у зведений індикатор прийняття рішень. Розроблена

архітектура системи смарт-моніторингу забезпечує інтеграцію різномірних джерел даних, їх аналітичну обробку та реалізацію механізмів прогнозування небезпечних ситуацій у реальному часі, що дозволяє перейти від реактивного спостереження до проактивного управління безпекою судноплавства. Практична цінність отриманих результатів полягає у можливості їх використання в інтегрованих мостикових системах, а також у перспективності застосування в автономних і безекіпажних суднах.

1. International Maritime Organization. (1996). *Performance standards for integrated bridge systems (IBS)*. Resolution MSC.64(67), Annex 1. IMO. Retrieved from [https://www.imo.org/en/OurWork/Safety/Pages/Integrated-bridge-system-\(IBS\).aspx](https://www.imo.org/en/OurWork/Safety/Pages/Integrated-bridge-system-(IBS).aspx)
2. Chen, H., Wen, Y., Huang, Y., Xiao, C., & Dai, H. (2024). From integrated bridge system to marine bridge domain: A computational perspective. *Ocean Engineering*, 298, 117171. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.117171>
3. Lu, N., Xu, T., Xia, L., & Dong, G. (2023). Numerical investigation of hydrodynamic responses of a moored liquefied natural gas ship under multimodal waves. *Water*, 15(21), 3804. <https://doi.org/10.3390/w15213804>
4. An, Kwang. "E-navigation Services for Non-SOLAS Ships." *International Journal of E-Navigation and Maritime Economy* 4, (2016): 13-22. Accessed April 6, 2026. <https://doi.org/10.1016/j.enavi.2016.06.002>.
5. Baldauf, Michael, and Sun Hong. "Improving and Assessing the Impact of E-Navigation Applications." *International Journal of E-Navigation and Maritime Economy* 4, (2016): 1-12. Accessed April 6, 2026. <https://doi.org/10.1016/j.enavi.2016.06.001>.
6. Breton, Daniel, Jennifer Barry, and Lisa Vandehei. "Improving Canada's Marine Navigation System through E-Navigation." *International Journal of E-Navigation and Maritime Economy* 4, (2016): 23-30. Accessed April 6, 2026. <https://doi.org/10.1016/j.enavi.2016.06.003>.
7. Hahn, Axel. "Test Bed for Safety Assessment of New E-Navigation Systems." *International Journal of E-Navigation and Maritime Economy* 1, (2014): 14-28. Accessed April 6, 2026. <https://doi.org/10.1016/j.enavi.2014.12.003>.
8. Liu, Sheng, Bowen Xing, Bing Li, and Mingming Gu. "Ship Information System: Overview and Research Trends." *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering* 6, no. 3 (2014): 670-684. Accessed April 6, 2026. <https://doi.org/10.2478/IJNAOE-2013-0204>.
9. Ma, Xiaolong, Wen Xiong, Yu Fang, and C.S. Cai. "Safety Assessment of Ship-bridge System during Sea Transportation under Complex Sea States." *Ocean Engineering* 286, (2023): 115630. Accessed April 6, 2026. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.115630>.
10. Perera, Lokukaluge P., and C. Guedes Soares. "Collision Risk Detection and Quantification in Ship Navigation with Integrated Bridge Systems." *Ocean Engineering* 109, (2015): 344-354. Accessed April 6, 2026. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2015.08.016>.
11. Sui, Zhongyi, Yamin

Huang, Yuanqiao Wen, Chunhui Zhou, and Xi Huang. "Marine Traffic Profile for Enhancing Situational Awareness Based on Complex Network Theory." *Ocean Engineering* 241, (2021): 110049. Accessed April 6, 2026. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.110049>. 12. Nosov, P., Melnyk, O., Malaksiano, M., Mamenko, P., Onyshko, D., Fomin, O., Píšťek, V., & Kučera, P. (2025). Machine learning-based semantic analysis of scientific publications for knowledge extraction in safety-critical domains. *Machine Learning and Knowledge Extraction*, 7(4). <https://doi.org/10.3390/make7040150>. 13. Kurdiuk, S., Dremluk, V., Melnyk, O., Onishchenko, O., Fomin, O., Píšťek, V., & Kučera, P. (2025). Development of a High-Reliability Hybrid Data Transmission System for Unmanned Surface Vehicles Under Interference Conditions. *Drones*, 9(3). <https://doi.org/10.3390/drones9030174>. 14. Yarovenko, V., Shumylo, O., Malaksiano, M., Melnyk, O., Nosov, P., Píšťek, V., & Kučera, P. (2026). Analytical Evaluation of Hull-Design Parameters Affecting Ship Controllability and Dynamic Behaviour with Integrated Electric-Propulsion Systems. *Journal of Marine Science and Engineering*, 14(2). <https://doi.org/10.3390/jmse14020122>. 15. Nosov, P., Melnyk, O., Malaksiano, M., Shumylo, O., Onishchenko, O., Yarovenko, V., Zinchenko, S., & Popovych, I. (2026). A Unified Fractal Processing Framework for Normalized AIS and ECDIS Ship Trajectories. *Digital*, 6(1). <https://doi.org/10.3390/digital6010011>

REFERENCES

1. International Maritime Organization. (1996). *Performance standards for integrated bridge systems (IBS)*. Resolution MSC.64(67), Annex 1. IMO. Retrieved from [https://www.imo.org/en/OurWork/Safety/Pages/Integrated-bridge-system-\(IBS\).aspx](https://www.imo.org/en/OurWork/Safety/Pages/Integrated-bridge-system-(IBS).aspx)
2. Chen, H., Wen, Y., Huang, Y., Xiao, C., & Dai, H. (2024). From integrated bridge system to marine bridge domain: A computational perspective. *Ocean Engineering*, 298, 117171. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.117171>
3. Lu, N., Xu, T., Xia, L., & Dong, G. (2023). Numerical investigation of hydrodynamic responses of a moored liquefied natural gas ship under multimodal waves. *Water*, 15(21), 3804. <https://doi.org/10.3390/w15213804>
4. An, Kwang. "E-navigation Services for Non-SOLAS Ships." *International Journal of E-Navigation and Maritime Economy* 4, (2016): 13-22. Accessed April 6, 2026. <https://doi.org/10.1016/j.enavi.2016.06.002>.
5. Baldauf, Michael, and Sun Hong. "Improving and Assessing the Impact of E-Navigation Applications." *International Journal of E-Navigation and Maritime Economy* 4, (2016): 1-12. Accessed April 6, 2026. <https://doi.org/10.1016/j.enavi.2016.06.001>.
6. Breton, Daniel, Jennifer Barry, and Lisa Vandehei. "Improving Canada's Marine Navigation System through E-Navigation." *International Journal of E-Navigation and Maritime Economy* 4, (2016): 23-30. Accessed April 6, 2026.

- <https://doi.org/10.1016/j.enavi.2016.06.003>. 7. Hahn, Axel. "Test Bed for Safety Assessment of New E-Navigation Systems." *International Journal of E-Navigation and Maritime Economy* 1, (2014): 14-28. Accessed April 6, 2026. <https://doi.org/10.1016/j.enavi.2014.12.003>. 8. Liu, Sheng, Bowen Xing, Bing Li, and Mingming Gu. "Ship Information System: Overview and Research Trends." *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering* 6, no. 3 (2014): 670-684. Accessed April 6, 2026. <https://doi.org/10.2478/IJNAOE-2013-0204>. 9. Ma, Xiaolong, Wen Xiong, Yu Fang, and C.S. Cai. "Safety Assessment of Ship-bridge System during Sea Transportation under Complex Sea States." *Ocean Engineering* 286, (2023): 115630. Accessed April 6, 2026. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.115630>. 10. Perera, Lokukaluge P., and C. Guedes Soares. "Collision Risk Detection and Quantification in Ship Navigation with Integrated Bridge Systems." *Ocean Engineering* 109, (2015): 344-354. Accessed April 6, 2026. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2015.08.016>. 11. Sui, Zhongyi, Yamin Huang, Yuanqiao Wen, Chunhui Zhou, and Xi Huang. "Marine Traffic Profile for Enhancing Situational Awareness Based on Complex Network Theory." *Ocean Engineering* 241, (2021): 110049. Accessed April 6, 2026. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.110049>. 12. Nosov, P., Melnyk, O., Malaksiano, M., Mamenko, P., Onyshko, D., Fomin, O., Píšťek, V., & Kučera, P. (2025). Machine learning-based semantic analysis of scientific publications for knowledge extraction in safety-critical domains. *Machine Learning and Knowledge Extraction*, 7(4). <https://doi.org/10.3390/make7040150>. 13. Kurdiuk, S., Dremluk, V., Melnyk, O., Onishchenko, O., Fomin, O., Píšťek, V., & Kučera, P. (2025). Development of a High-Reliability Hybrid Data Transmission System for Unmanned Surface Vehicles Under Interference Conditions. *Drones*, 9(3). <https://doi.org/10.3390/drones9030174>. 14. Yarovenko, V., Shumylo, O., Malaksiano, M., Melnyk, O., Nosov, P., Píšťek, V., & Kučera, P. (2026). Analytical Evaluation of Hull-Design Parameters Affecting Ship Controllability and Dynamic Behaviour with Integrated Electric-Propulsion Systems. *Journal of Marine Science and Engineering*, 14(2). <https://doi.org/10.3390/jmse14020122>. 15. Nosov, P., Melnyk, O., Malaksiano, M., Shumylo, O., Onishchenko, O., Yarovenko, V., Zinchenko, S., & Popovych, I. (2026). A Unified Fractal Processing Framework for Normalized AIS and ECDIS Ship Trajectories. *Digital*, 6(1). <https://doi.org/10.3390/digital6010011>.
-

Hennadiy Shcheniavskyi [1, ORCID: 0000-0001-7803-978X],

Senior Lecturer, Department of Navigation and Maritime Safety,

Oleksiy Melnyk, [1, ORCID: 0000-0001-9228-8459],

Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of
Navigation and Maritime Safety,

¹ Odessa National Maritime University

SMART MONITORING IN INFORMATION AND NAVIGATION SYSTEMS ON MODERN SHIPS

At the current stage of development in the maritime industry, a ship functions as a complex hub for aggregating large volumes of data. The implementation of the e-navigation concept and the evolution of integrated bridge systems (IBS) have created an urgent need to transition from the passive display of navigational information to its in-depth intellectual analysis. Traditional approaches to monitoring are often limited to merely visualizing data streams, which, in conditions of heavy shipping traffic, increases the cognitive load on the navigator and creates conditions for human-induced errors. This paper conducts a systematic analysis of the main sources of navigational information, including Automatic Identification Systems (AIS), Global Navigation Satellite Systems (GNSS), shipborne radar stations (RCS), and Electronic Chart Display and Information Systems (ECDIS). It was found that the effectiveness of their direct use is limited by the fragmentary nature of the data, the presence of hardware errors, and the lack of a unified framework for interpreting the situational context. To resolve these issues, the concept of smart monitoring is proposed as an integrated process of processing, filtering, and analytically evaluating motion parameters in real time. A formalized architecture of a smart monitoring system is proposed, based on the cascaded application of mathematical data integration operators. The model is based on an algorithm for assessing relative vessel motion parameters, which uses dynamic indicators of the closest point of approach (CPA) and time to CPA (TCPA) to accurately identify the level of navigational threat. The key scientific result is the development of a risk function and the synthesis of the Safety Risk Index (SRI), an indicator that enables a quantitative assessment of the current situation by transforming disparate technical parameters into recommendations for management decision-making. The proposed

approach facilitates a transition from reactive monitoring to proactive safety management, where the system is capable of predicting the development of hazardous scenarios even before they reach their critical phase.

Keywords: *maritime transport, navigation safety, smart monitoring, ship navigation systems, AIS, GNSS, ECDIS, radar, CPA, TCPA, risk assessment, safety index, integrated bridge systems, e-navigation.*

Отримано: 31 березня 2026 року
Прорецензовано: 27 квітня 2026 року
Прийнято до друку: 29 травня 2026 року



© 2026 [Hennadiy Shcheniavskyi, Oleksiy Melnyk]. Licensee [NUWEE]. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution-NonCommercial (CC BY-NC) license ([creativecommons.org](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)).