

## ОЦІНКА ТА ПІДТРИМКА ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ СТІЙКОСТІ ЗАСОБІВ ВОДНОГО ТРАНСПОРТУ

**Передерій В. І.**, д.т.н., професор, професор кафедри комп'ютерних технологій і інформаційної безпеки Національного університету кораблебудування ім. адм. Макарова, м. Миколаїв, Україна, e-mail: viperkms1@gmail.com, ORCID: 0000-0002-9241-3034;

**Борчик Є. Ю.**, к.ф.-м.н., доцент, доцент кафедри вищої та прикладної математики Миколаївського національного аграрного університету, м. Миколаїв, Україна, e-mail: borchikeu@gmail.com, ORCID: 0000-0003-0188-1471.

Стаття присвячена питанням розробки методів і засобів інформаційної технології оцінки та підтримки функціональної стійкості засобу водного транспорту для забезпечення відмовостійкості та живучості засобу на базі взаємодії комплексу показників безпеки і показників людського чинника в управлінні та прийнятті рішень на кожному її ієрархічному рівні. Проведено аналіз досліджень у галузі розробки методів і засобів та їх практичного застосування в забезпеченні стійкості засобів водного транспорту. Виявлено, що на поточний момент часу перспективним напрямом наукових досліджень є необхідність у створенні методів, засобів та інформаційних технологій оцінки, контролю та підтримки як технічного і безпекового стану засобу водного транспорту, так і інформаційно-когнітивних параметрів людського фактора у реальному часі. Доведено, що важливим аспектом успішного застосування зазначених методів є не лише їх використання в адаптованих СППР для прийняття релевантних рішень з безпеки, а й розвиток теорії функціональної стійкості, яка має ґрунтуватись на сучасних принципах гібридного інтелекту – симбіотичної інтеграції функціональності штучного та природного інтелектів. Розроблено інформаційно-логічну модель та проведено експертну оцінку за ступенем важливості комплексу показників стабільності і безпеки, що характеризують відмовостійкість і живучість, та визначено показники інформаційно-когнітивних параметрів людського фактора, які впливають на функціональну стійкість засобу водного транспорту. Залежно від стану зазначених показників побудовано нечітку байєсовську мережу довіри, за допомогою якої на підставі знань експертів проведено комплексну оцінку ймовірності станів функціональної стійкості засобу водного транспорту. Здійснено практичну реалізацію запропонованого методу, отримані результати підтвердили практичну цінність, яка може бути використана для оцінки та забезпечення комплексної функціональної стійкості засобу. Перспективним напрямом подальших досліджень є розробка методів та засобів адаптивної інформаційної технології, яка повинна мати властивість переналаштування параметрів і здійснювати «приспосовування» до зміни внутрішніх і зовнішніх умов роботи, що забезпечить функціональну стійкість засобу водного транспорту.

**Ключові слова:** інформаційні технології; системи підтримки прийняття рішень; функціональна стійкість; засоби водного транспорту; інформаційно-когнітивні параметри; гібридний інтелект; інформаційно-логічна модель; математична модель; людський фактор.

DOI: 10.33815/2313-4763.2025.2.31.064-076

**Вступ.** Дослідження статистичних даних [1–3] показали, що основною причиною аварій при управлінні засобами водного транспорту є такі як людський фактор, поломки, пошкодження, відмова двигунів і суднового устаткування, а також прийняття нерелевантного рішення по управлінню судном. Особливо вразливими є системи вантажного судна де значною причиною аварій є також зовнішні чинники, які впливають на системи автоматизації судна, енергетичні установки, автоматизацію судна, що проявляється в погіршенні параметрів технічних установок за якісними показниками та експлуатаційними характеристиками в цілому. Всі ці чинники впливають на функціональну стійкість засобів водного транспорту.

Властивість функціональної стійкості в цілому розглядається як можливість складної технічної системи успішно завершати поставлене завдання при регламентованому числі змін у стані самої системи, тобто зберігати її працездатність після прояву припустимого числа відмов і зовнішніх дестабілізуючих впливів. До такої складної технічної системи можна віднести і системи засобів водного транспорту відповідної категорії критичності [4].

Оскільки теорія функціональної стійкості перебуває в стадії розвитку, формування та оцінка її основних показників є важливим напрямом наукових досліджень. Отже, можна зробити висновок, що ідея забезпечення властивості функціональної стійкості засобу водного транспорту є актуальною, оскільки існуюча теорія не розглядає такий вид взаємовпливу дестабілізуючих чинників.

**Постановка проблеми.** На сьогодні в наукових дослідженнях наводяться обставини і фактори, що створюють умови і передумови для виникнення помилок у рішеннях і діях судноводіїв, які можуть привести до небезпечної ситуації або аварії. Тому зусилля Міжнародної морської організації (ІМО) [4–6] стали потужним стимулом до досліджень, які стосуються питань ролі «людського фактора», процесу ризикових умов стану функціонування технічних та технологічних засобів, стану інформаційної і кібербезпеки, які мають значний вплив на функціональну стійкість засобу водного транспорту.

Але все це не дає можливість описати з максимальною точністю взаємозалежність *НЕ*-факторів впливу, для яких немає відомих точних закономірностей, у нечітких умовах та ризику, що вимагає розробки нового інструментарію забезпечення стійкості функціонування при управлінні засобами водного транспорту.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** У наукових роботах [7–9] запропоновані методи, які дають можливість визначати сумарний ризик та величину збитків у результаті сумарної дії множини факторів загроз на об'єктах критичної інфраструктури (ОКІ). Зазначено також, що процес визначення та оцінки ризику від помилкових прийнятих рішень під впливом цих загроз є основою та підґрунтям для наукових досліджень в області аналізу та удосконалення наявних, а також винаходу нових методів оцінки ризику, підвищення точності його оцінки, здійснення над ризиками математичних операцій.

У наукових дослідженнях [10, 11] розглянуті питання створення інформаційної технології визначення, оцінки і корекції функціональної стійкості особи, що приймає рішення (ОПР) для процесу прийняття релевантних рішень у складних людино-машинних системах критичного призначення. Виділені основні найбільш негативно вразливі фактори на функціональну стійкість ОКІ в критичних ситуаціях.

У роботі [12] досліджено широкий спектр загроз, які призводять до ризику функціонування ОКІ, створено базу даних фактичних втрат у випадку реалізації цих загроз, здійснено аналіз втрат з використанням методів статистики та актуарної математики.

У роботах [13, 14] наведені проблеми про ризики, пов'язані з інформаційними та когнітивними аспектами взаємодії людини з машиною. Зазначено необхідність враховувати ризики у непередбачуваних умовах та особливі вимоги до психофізіологічного стану людини-оператора. Запропонована кількісна оцінка надійності людини, яка базується на загальному імовірнісному аналізі безпеки. Але не досліджувались моделі та методи оперативної оцінки емоціонально-когнітивного стану людини-оператора при формуванні адаптованих альтернатив прийняття рішень у критичних ситуаціях при управлінні ОКІ.

У дослідженнях [15–17] зазначено: основні джерела факторів безпеки, які значно відрізняються від інших категорій ризиків, якими є людська поведінка. Наведено процес визначення ризиків від помилкових прийнятих рішень ОПР під впливом загроз. Але не досліджено моделі та методи оцінки залежності функціональної стійкості від впливу *НЕ*-факторів інформаційної і кібербезпеки та технічного стану ОКІ в цілому.

У роботах [18–20] запропоновані методи, які дають можливість визначати сумарну величину збитків у результаті дії факторів загроз за певний період часу. Зазначено також, що процес визначення та оцінки ризику від помилкових прийнятих рішень під впливом факторів загроз є основою та підґрунтям для наукових досліджень в області аналізу та удосконалення наявних, а також винаходу нових методів оцінки ризику, підвищення точності його оцінки. Рекомендовано у процесі функціонування ОКІ враховувати ризики нерелевантного прийняття рішень ОПР, що виникають у непередбачуваних умовах, а також особливі вимоги до емоційно-когнітивного стану людини та допуску її до виконання особливо відповідальної

роботи. Відзначено також, що інформаційні та когнітивні аспекти інженерії людського фактора відіграють ключову роль у безпеці, надійності та ефективності управління ОКІ.

За підсумками проведеного аналізу літературних джерел [1–20] із проблеми, що досліджується, можна зробити висновок про відсутність ефективних методів забезпечення взаємної адаптації і корекції адекватного впливу дестабілізуючих *НЕ*-факторів загроз та оптимального розподілу функцій між технічними засобами та ОПР з урахуванням його психофізіологічних та когнітивних можливостей для забезпечення функціональної стійкості ОКІ. Однак розв'язання цієї проблеми виходить за рамки можливостей традиційних методів та засобів вирішення цих питань. Для цього істотну роль необхідно приділяти аспекту, який має ґрунтуватися на сучасних принципах гібридного інтелекту – симбіотичної інтеграції функціональностей штучного (комп'ютера) та природного (людини) інтелектів.

Таким чином, створення методів інформаційної технології оцінки та забезпечення функціональної стійкості, та їх подальше практичне використання при управлінні засобами водного транспорту, являє собою актуальну науково-практичну задачу сьогодення, і є предметом даного дослідження.

**Мета та задачі дослідження.** Метою дослідження є розробка методу інформаційної технології оцінки та підтримки функціональної стійкості засобів водного транспорту відповідної категорії критичності, який доповнює теорію та технології вирішення питань забезпечення відмовостійкості та живучості засобу на базі взаємодії комплексу показників безпеки і показників людського чинника в управлінні та прийнятті рішень на кожному її ієрархічному рівні.

**Досягнення поставленої мети дослідження передбачає:** розробку методу, який повинен мати властивість здійснювати «приспосовування» до зміни внутрішніх і зовнішніх умов роботи, що забезпечить функціональну стійкість засобу. Для цього необхідно вирішення наступних задач:

1. Розробити інформаційно-логічну модель оцінки та підтримки функціональної стійкості засобу водного транспорту в режимі реального часу.
2. Розробити математичну модель оцінки та підтримки функціональної стійкості засобу водного транспорту з застосуванням методів м'яких обчислень.
3. Провести експеримент доцільності запропонованого методу для оцінки і підтримки функціональної стійкості засобу водного транспорту.

**Виклад основного матеріалу.** На основі проведеного аналізу [18–20] побудовано інформаційно-логічну модель ІТ оцінки стану показників функціональної стійкості засобу водного транспорту залежно від впливу основних дестабілізуючих *НЕ*-факторів у режимі реального часу (рис. 1).

Фактори гідрометеорологічного впливу  $Sext = f_1(IV, NI, Ssea, CC, Svl)$ : *IV* – низька видимість; *NI* – інтенсивність шуму; *Ssea* – стан моря; *CC* – кліматичні умови; *Svl* – вітрове навантаження.

Показники впливу людського фактора на процес прийняття релевантних рішень, пов'язаних з гідрометеорологічним впливом  $Sw = f_1(EA, SE, F, ET)$ : *ET* – емоційна напруженість; *F* – фізична та емоційна втома; *SE* – стрес через емоційну напруженість; *EA* – емоційне збудження.

Фактори, пов'язані з поточним емоційно-когнітивним станом ОПР  $Sp = f_2(PR, PI, RT, DT, C)$ : *PR* – продуктивність; *PI* – сприйняття інформації; *RT* – час реакції; *DT* – час на прийняття рішень; *C* – зосередженість.

Основні фактори інформаційної безпеки  $IStl = f_1(DC, AD, DP, DI)$ : *DC* – узгодженість даних; *AD* – доступність даних; *DP* – конфіденційність даних, *DI* – цілісність даних.

Технічний стан основних суднових установок  $Tshipins = f_1(Csnav, Csau, Cprov)$ : *Csnav* – стан суднових навігаційних приладів; *Csau* – стан системи автоматики судна; *Cprov* – стан енергетичних установок; *Cstat* – стан суднового зв'язку.

Особливістю зазначених факторів є неможливість їх безпосереднього виміру і запису в числовому виді. Для цього існують різні тести для оцінки, однак вони вимагають затрат часу і можуть представляти результат з деякою мірою невизначеності.



Рисунок 1 – Інформаційно – логічна модель оцінки функціональної стійкості засобу водного транспорту

Для рішення вказаних проблемних питань та кількісної оцінки оперативного стану функціональної стійкості засобу водного транспорту пропонується застосування ймовірнісного математичного апарату з використанням Байєсовської мережі довіри (БМД) [21].

БМД – це ймовірнісна графічна модель, що задається випадковими величинами та їх умовними ймовірностями за допомогою ациклічного орієнтованого графа.

Для будь-якої множини випадкових величин (вершин)  $A_1, A_2, \dots, A_n$  Байєсовської мережі довіри ймовірність спільного розподілу обчислюється за умовними ймовірностями за ланцюговим правилом:

$$P(A_1, \dots, A_n) = \prod_{i=1}^n P(A_i | \text{Parents}(A_i)). \quad (1)$$

Для обчислення ймовірності того, що змінна  $B$  набуває значення  $b_j$  на БМД, що складається із вершин  $B, A_1, \dots, A_n$  використовується формула

$$P(B = b_j) = \sum_{A_1, \dots, A_n} P(B = b_j, A_1, A_2, \dots, A_n), \quad (2)$$

де підсумовування проводиться за всіма значеннями змінних  $A_1, A_2, \dots, A_n$ . З урахуванням (1) формула (2) для обчислення ймовірності у вершині  $B$  набуває вигляду:

$$P(B = b_j) = \sum_{A_1, \dots, A_n} P(B = b_j | \text{Parents}(B)) \times \prod_{i=1}^n P(A_i | \text{Parents}(A_i)). \quad (3)$$

Цих формул достатньо для здійснення прямого виведення на Байєсівській мережі, тобто визначення ймовірності значень вершини – листка за відомими ймовірностями значень вхідних (кореневих) вершин та умовними ймовірностями значень інших вершин БМД.

На підставі інформаційно-логічної моделі оцінки функціональної стійкості засобу водного транспорту побудовано Байєсовську мережу довіри (рис. 2).

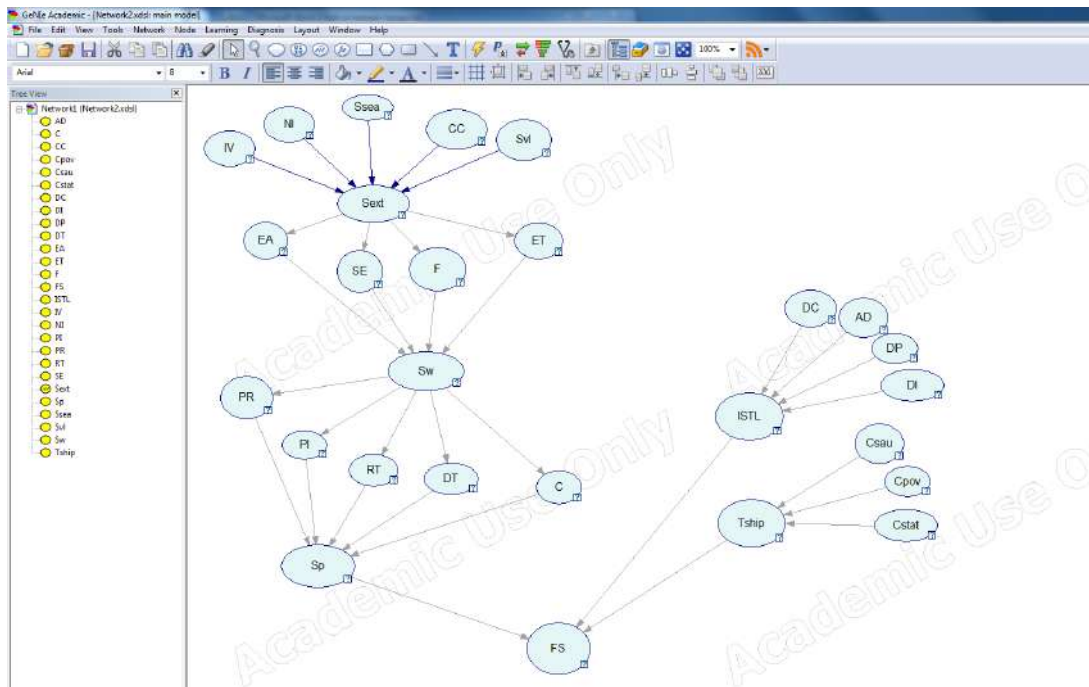


Рисунок 2 – Байєсовська мережа довіри оцінки функціональної стійкості засобу водного транспорту

Вважається, що всі вершини запропонованої Байєсовської мережі окрім  $FS$  приймають лише два значення: "норма", "не норма". Вершина  $FS$  приймає значення "функціонально стійкий", "функціонально не стійкий".

Оскільки значення безумовних та умовних ймовірностей вершин БМД встановлюються за підсумками результатів експертного опитування, то всі вони визначаються нечітко. Тому в Байєсовську мережу (рис. 2) вводиться нечіткість шляхом заміни ймовірностей станів нечіткими числами, а звичайних арифметичних операцій над дійсними числами розширеними операціями над нечіткими числами [19, 22].

Усі безумовні та умовні ймовірності Байєсовської мережі оцінюються нечіткими інтервалами  $\tilde{N}(n_1, n_2, n_3, n_4)$ , заданими на універсальній множині  $\{x | 0 \leq x \leq 1\}$ , де  $x$  – ймовірність станів вершин. При цьому функція приналежності цих інтервалів визначається формулою:

$$\mu_L(x) = \begin{cases} 0, & x < 0; \\ \frac{x - n_1}{n_2 - n_1}, & n_1 \leq x \leq n_2; \\ 1, & n_2 \leq x \leq n_3; \\ \frac{n_4 - x}{n_4 - n_3}, & n_3 < x \leq n_4; \\ 0, & x > 1, \end{cases} \quad (4)$$

де  $n_1 \leq n_2 \leq n_3 \leq n_4$  – деякі дійсні числа, в  $0 \leq n_2 \leq n_3 \leq 1$ . Зокрема, якщо  $0 \leq n_1 \leq n_2 \leq n_3 \leq n_4 \leq 1$ , то (4) задає трапецієподібне нечітке число.

При необхідності порівняння нечітких ймовірностей вважається, що з двох нечітких ймовірностей більше та дефазифікаційне значення якої більше. В якості методу дефазифікації використовується метод центру максимумів. Цей метод для нечітких чисел  $\tilde{N}(n_1, n_2, n_3, n_4)$  з функцією приналежності (4) дає

$$N = \frac{\int_{n_2}^{n_3} x dx}{\int_{n_2}^{n_3} dx} = \frac{n_2 + n_3}{2}. \quad (5)$$

При обчисленні нечітких ймовірностей  $\tilde{P}_f$  у вершинах Байєсовської мережі формули (1), (3) приймають вигляд:

$$\tilde{P}_f(A_1, \dots, A_n) \cong \bigotimes_{i=1}^n \tilde{P}_f | \text{Parents}(A_i); \quad (6)$$

$$\tilde{P}_f(B = b_j) \cong \bigoplus_{A_1, \dots, A_n} \tilde{P}_f(B = b_j | \text{Parents}(B)) \bigotimes \left[ \bigotimes_{i=1}^n \tilde{P}_f(A_i | \text{Parents}(A_i)) \right]. \quad (7)$$

Тут  $\bigotimes_{i=1}^n A_i$  позначає множення нечітких чисел  $A_1, \dots, A_n$ ,  $\bigoplus_{A_1, \dots, A_n}$  – нечітке додавання

по всім значенням змінних  $A_1, \dots, A_n$ .

Для простоти визначення експертами умовних ймовірностей вважається [20–22], що умовна ймовірність у будь-якій вершині залежить від значень батьківських для неї вершин окремо, а не від спільного розподілу значень цих вершин. Тоді, якщо серед вершин  $A_1, \dots, A_n$  батьківські є лише у вершини  $A_1$  і цими вершинами є вершини  $A_2, A_3, \dots, A_n$ , то останнє припущення дозволяє формулу (6) переписати у вигляді:

$$\tilde{P}_f(A_1, \dots, A_n) \cong \bigotimes_{i=2}^n \tilde{P}_f(A_i) \bigotimes_{j=2}^n \tilde{P}_f(A_1 | A_j). \quad (8)$$

Для прикладу розглядається спрощена Байєсовська мережа (рис. 3).

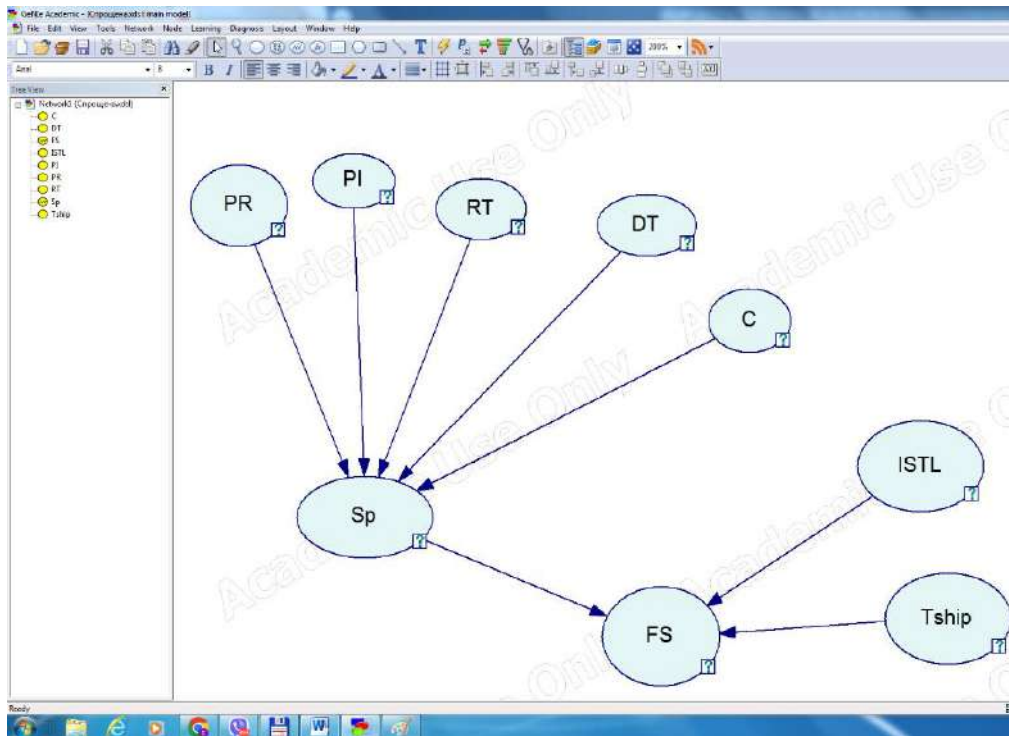


Рисунок 3 – Фрагмент нечіткої БМД

Процедура розрахунку значень ймовірностей Байєсовської мережі включає два етапи. У першому етапі за допомогою (6) – (8) обчислюється нечітка повна ймовірність вершини  $Sp$ , яка має п'ять батьківських вершин:  $PR, PI, RT, DT, C$ .

$$\begin{aligned} \tilde{P}_f(Sp = n) &\cong \bigoplus_{PR, PI, RT, DT, C} \tilde{P}_f(n, PR, PI, RT, DT, C) = \\ &= \bigoplus_{PR, PI, RT, DT, C} \tilde{P}_f(PR) \tilde{\otimes} \tilde{P}_f(PI) \tilde{\otimes} \tilde{P}_f(RT) \tilde{\otimes} \tilde{P}_f(DT) \tilde{\otimes} \tilde{P}_f(C) \tilde{\otimes} \tilde{P}_f(n_2 | PR, PI, RT, DT, C) = \\ &= \bigoplus_{PR, PI, RT, DT, C} \tilde{P}_f(PR) \tilde{\otimes} \tilde{P}_f(PI) \tilde{\otimes} \tilde{P}_f(RT) \tilde{\otimes} \tilde{P}_f(DT) \tilde{\otimes} \tilde{P}_f(C) \tilde{\otimes} \tilde{P}_f(n_2 | PR) \tilde{\otimes} \tilde{P}_f(n_2 | PI) \tilde{\otimes} \quad (9) \\ &\tilde{\otimes} \tilde{P}_f(n_2 | RT) \tilde{\otimes} \tilde{P}_f(n_2 | DT) \tilde{\otimes} \tilde{P}_f(n_2 | C). \end{aligned}$$

У другому етапі за допомогою (6) – (8) обчислюються нечіткі повні ймовірності вершини-листка  $FS$ :

$$\begin{aligned} \tilde{P}_f(FS = yes) &\cong \bigoplus_{Sp, ISTL, Tship} \tilde{P}_f(yes, Sp, ISTL, Tship) = \\ &= \bigoplus_{Sp, ISTL, Tship} \tilde{P}_f(Sp) \tilde{\otimes} \tilde{P}_f(ISTL) \tilde{\otimes} \tilde{P}_f(Tship) \tilde{\otimes} \tilde{P}_f(yes | Sp, ISTL, Tship) = \quad (10) \\ &= \bigoplus_{Sp, ISTL, Tship} \tilde{P}_f(Sp) \tilde{\otimes} \tilde{P}_f(ISTL) \tilde{\otimes} \tilde{P}_f(Tship) \tilde{\otimes} \tilde{P}_f(yes | Sp) \tilde{\otimes} \tilde{P}_f(yes | ISTL) \tilde{\otimes} \tilde{P}_f(yes | Tship) \end{aligned}$$

**Експерименти.** Для перевірки запропонованого методу були проведені числові експерименти, суть яких полягала в наступному.

Експертам-фахівцям було запропоновано провести оцінку умовних ймовірностей можливих станів вершин  $Sp$  та  $FS$ , які характеризують поточний емоційно-когнітивний стан ОНР та функціональну стійкість засобу водного транспорту відповідно. Результати представлені у вигляді нечітких значень безумовних ймовірностей у таблиці 1.

Згідно з формулами (9–10) у середовищі MATLAB було обчислено значення нечіткої ймовірності вузлів мережі, що розглядається. Використовуючи формулу (5), було обчислено дефазифікаційні значення цих ймовірностей. На основі значення дефазифікаційного значення ймовірності  $P(FS = \text{"функціонально стійкий"})$ , зроблено висновок про стан функціональної стійкості засобу водного транспорту.

**Основні результати та їх обговорення.** Числові розрахунки проводились для двох характерних випадків. У першому випадку безумовні ймовірності вершин  $PR, PI, RT, DT, C$ , які характеризують поточний емоційно-когнітивний стан ОНР; вершина  $STL$ , яка характеризує інформаційну безпеку засобу водного транспорту та вершина  $Tship$ , що характеризує технічний стан основних суднових установок приймають нечіткі трапецієвидні значення, представлені в таблиці 2. Як видно з формули (5) дефазифікаційні значення ймовірностей цих вершин однакові і дорівнюють 0.9 для стану вершин "норма" та 0.1 для стану вершин "не норма". Тобто, всі фактори, що впливають на функціональну стійкість засобу водного транспорту з великою ймовірністю знаходяться в стані "норма". У другому випадку безумовні ймовірності (таблиця 2) приймають ті ж самі значення, як у першому випадку, окрім вершини  $DT$  (час на прийняття рішень). При цьому  $\tilde{P}_f(DT = \text{норма}) = (0.6; 0.7; 0.7; 0.8)$ , а  $\tilde{P}_f(DT = \text{не норма}) = (0.2; 0.3; 0.3; 0.4)$ , а дефазифікаційні значення  $P(DT = \text{норма}) = 0.7$ , а  $P(DT = \text{не норма}) = 0.3$ . Як видно з результатів, помітно зменшилась тільки ймовірність того, що час на прийняття рішень ОНР є "норма".

Результати числових розрахунків наведено в таблицях 3 та 4.

У таблиці 1 через  $p$  позначено значення вершини "норма";  $po$  – "не норма";  $yes$  – "функціонально стійкий";  $ns$  – "функціонально не стійкий".

Таблиця 1 – Результати оцінки нечітких умовних ймовірностей у вузлах Sp та FS

|              | Нечітке значення ймовірності       |                                |      | Нечітке значення ймовірності      |                                |
|--------------|------------------------------------|--------------------------------|------|-----------------------------------|--------------------------------|
|              | Вершина $Sp$                       |                                |      | Вершина $Sp$                      |                                |
| $PR$         | $\tilde{P}_f(Sp = n \mid PR)$      | $\tilde{P}_f(Sp = no \mid PR)$ | $DT$ | $\tilde{P}_f(Sp = n \mid DT)$     | $\tilde{P}_f(Sp = no \mid DT)$ |
| n            | (1.0; 1.0; 1.0; 1.0)               | (0.0; 0.0; 0.0; 0.0)           | n    | (1.0; 1.0; 1.0; 1.0)              | (0.0; 0.0; 0.0; 0.0)           |
| no           | (0.7; 0.85; 0.95; 1.0)             | (0.0; 0.05; 0.15; 0.3)         | no   | (0.5; 0.6; 0.6; 0.9)              | (0.1; 0.4; 0.4; 0.5)           |
| $PI$         | $\tilde{P}_f(Sp = n \mid PI)$      | $\tilde{P}_f(Sp = no \mid PI)$ | C    | $\tilde{P}_f(Sp = n \mid C)$      | $\tilde{P}_f(Sp = no \mid C)$  |
| n            | (1.0; 1.0; 1.0; 1.0)               | (0.0; 0.0; 0.0; 0.0)           | n    | (1.0; 1.0; 1.0; 1.0)              | (0.0; 0.0; 0.0; 0.0)           |
| no           | (0.7; 0.8; 1.0; 1.0)               | (0.0; 0.0; 0.2; 0.3)           | no   | (0.7; 0.8; 1.0; 1.0)              | (0.0; 0.0; 0.2; 0.3)           |
| $PI$         | $\tilde{P}_f(Sp = n \mid RT)$      | $\tilde{P}_f(Sp = no \mid RT)$ |      |                                   |                                |
| n            | (1.0; 1.0; 1.0; 1.0)               | (0.0; 0.0; 0.0; 0.0)           |      |                                   |                                |
| no           | (0.7; 0.8; 0.8; 1.0)               | (0.0; 0.2; 0.2; 0.3)           |      |                                   |                                |
| Вершина $FS$ |                                    |                                |      |                                   |                                |
| $Sp$         | $\tilde{P}_f(FS = yes \mid Sp)$    |                                |      | $\tilde{P}_f(FS = ns \mid Sp)$    |                                |
| n            | (1.0; 1.0; 1.0; 1.0)               |                                |      | (0.0; 0.0; 0.0; 0.0)              |                                |
| no           | (0.5; 0.6; 0.6; 1.0)               |                                |      | (0.0; 0.4; 0.4; 0.5)              |                                |
| $ISTL$       | $\tilde{P}_f(FS = yes \mid ISTL)$  |                                |      | $\tilde{P}_f(FS = ns \mid ISTL)$  |                                |
| n            | (1.0; 1.0; 1.0; 1.0)               |                                |      | (0.0; 0.0; 0.0; 0.0)              |                                |
| no           | (0.6; 0.9; 0.9; 1.0)               |                                |      | (0.0; 0.1; 0.1; 0.4)              |                                |
| $Tship$      | $\tilde{P}_f(FS = yes \mid Tship)$ |                                |      | $\tilde{P}_f(FS = ns \mid Tship)$ |                                |
| n            | (1.0; 1.0; 1.0; 1.0)               |                                |      | (0.0; 0.0; 0.0; 0.0)              |                                |
| no           | (0.6; 0.7; 0.9; 1.0)               |                                |      | (0.0; 0.1; 0.3; 0.4)              |                                |

Таблиця 2 – Значення нечітких безумовних ймовірностей у кореневих вузлах БМД

| <i>Нечітке значення ймовірності у вершині</i> |                        |    |                      |    |                      |
|-----------------------------------------------|------------------------|----|----------------------|----|----------------------|
|                                               | $PR$                   |    | $PI$                 |    | $RT$                 |
| n                                             | (0.6; 0.9; 0.9; 1.0)   | n  | (0.8; 0.9; 0.9; 1.0) | n  | (0.6; 0.9; 0.9; 1.0) |
| no                                            | (0.0; 0.1; 0.1; 0.4)   | no | (0.0; 0.1; 0.1; 0.2) | no | (0.0; 0.1; 0.1; 0.4) |
|                                               | $DT$                   |    | $C$                  |    | $ISTL$               |
| n                                             | (0.8; 0.85; 0.95; 1.0) | n  | (0.7; 0.8; 1.0; 1.0) | n  | (0.4; 0.8; 1.0; 1.0) |
| no                                            | (0.0; 0.15; 0.15; 0.2) | no | (0.0; 0.0; 0.2; 0.3) | no | (0.0; 0.0; 0.2; 0.6) |
|                                               | $Tship$                |    |                      |    |                      |
| n                                             | (0.7; 0.9; 0.9; 1.0)   |    |                      |    |                      |
| no                                            | (0.0; 0.1; 0.1; 0.3)   |    |                      |    |                      |

Таблиця 3 – Результати розрахунку ймовірностей у вузлах нечіткої БМД у першому випадку

| <i>Вершини</i>                       | <i>Sp</i>                                                     | <i>FS</i>                                                                     |
|--------------------------------------|---------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|
| Нечітке значення ймовірності         | $\tilde{P}_f(Sp = \text{"норма"}) = (0.46; 0.83; 0.97; 1.12)$ | $\tilde{P}_f(FS = \text{"функціонально стійкий"}) = (0.24; 0.86; 0.98; 1.45)$ |
| Дефазифікаційне значення ймовірності | $P(Sp = \text{"норма"}) = 0.9$                                | $P(FS = \text{"функціонально стійкий"}) = 0.92$                               |

Таблиця 4 – Результати розрахунку ймовірностей у вузлах нечіткої БМД у другому випадку

| <i>Вершини</i>                       | <i>Sp</i>                                                     | <i>FS</i>                                                                      |
|--------------------------------------|---------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|
| Нечітке значення ймовірності         | $\tilde{P}_f(Sp = \text{"норма"}) = (0.11; 0.75; 0.87; 1.23)$ | $\tilde{P}_f(FS = \text{"функціонально стійкий"}) = (-0.34; 0.81; 0.93; 1.87)$ |
| Дефазифікаційне значення ймовірності | $P(Sp = \text{"норма"}) = 0.81$                               | $P(FS = \text{"функціонально стійкий"}) = 0.87$                                |

Як видно з таблиці 3, ймовірність того, що засіб водного транспорту є функціонально стійким  $P(FS = \text{"функціонально стійкий"}) = 0.92$ .

Відповідно до Методики категоризації об'єктів критичної інфраструктури, затвердженої постановою Кабінету Міністрів України від 09 жовтня 2020 року № 1109, для даної категорії критичності ОКІ (по умовах експериментів прийнята перша категорія критичності), критичним значенням ймовірності того, що засіб водного транспорту є функціонально стійким вважається величина не менше  $P_{cr} = 0.9$ .

Оскільки, згідно з проведенням експериментом, розрахункова величина ймовірності  $P(FS = \text{"функціонально стійкий"}) = 0.92 > P_{cr}$ , то в першому випадку засіб водного транспорту можна вважати функціонально стійким.

Результати розрахунку значень нечіткої ймовірності вузлів мережі у другому випадку представлені в таблиці 4, з якої видно, що величина  $P(FS = \text{"функціонально стійкий"}) = 0.87$ , що менше ніж  $P_{cr} = 0.9$ . Отже, у даному разі не можна вважати, що засіб водного транспорту є функціонально стійким.

Отримані результати числових розрахунків добре узгоджуються з практичними ситуаціями прийняття рішень з забезпечення стійкості критичних об'єктів, до яких можна віднести і засоби водного транспорту. У першому випадку поточний емоційно-когнітивний стан ОПР, інформаційна безпека та технічний стан основних судових установок засобу з високою ймовірністю були в нормі. Функціональна стійкість засобу водного транспорту при таких умовах виявилась на достатньому рівні. У другому випадку дещо підвищилась ймовірність на час реакції прийняття рішень ОПР, що призвело до зниження функціональній стійкості до рівня, щоб вважати – судовий засіб є функціонально нестійким. У цьому випадку необхідне коригування стану негативного впливу відповідного фактору на ОПР відповідно до інженерно-психологічних рекомендацій та вимог.

**Висновки.** Визначено пріоритетні напрями наукових досліджень у напрямку розробки і впровадження методів і засобів інформаційної технології оцінки та підтримки стійкості засобів водного транспорту. У підсумку з'ясовано, що важливими аспектами успішного вирішення питань є забезпечення відмовостійкості та живучості засобу на базі взаємодії комплексу показників безпеки роботи та показників людського чинника, в управлінні і прийнятті рішень на кожному її ієрархічному рівні. Доведено, що важливим аспектом успішного застосування даного методу та розвиток теорії функціональної стійкості в цілому має ґрунтуватись на сучасних принципах гібридного інтелекту – симбіотичної інтеграції функціональностей штучного та природного інтелектів. Розроблено інформаційно-

логічну модель та проведено експертну оцінку за ступенем важливості комплексу показників стабільності і безпеки, визначено показники інформаційно-когнітивних параметрів людського фактора, які впливають на функціональну стійкість засобу водного транспорту. Побудовано нечітку Байєсовську мережу довіри, за допомогою якої на підставі знань експертів проведено комплексну оцінку ймовірності станів функціональної стійкості засобу. Здійснено практичну реалізацію запропонованого методу, отримані результати підтвердили практичну цінність, яка може бути використана як для оцінки та забезпечення комплексної функціональної стійкості, так і для побудови адаптованих СППР для прийняття релевантних рішень із забезпечення безпеки та стійкості засобу водного транспорту.

**Перспективи подальших досліджень.** Перспективним напрямом подальших досліджень є розробка методів та засобів адаптивної інформаційної технології, яка повинна мати властивість переналаштування параметрів і здійснювати «приспосовування» до зміни внутрішніх і зовнішніх умов роботи, що забезпечить функціональну стійкість засобу водного транспорту.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. European Maritime Safety Agency. *Annual overview of marine casualties and incidents 2020*. <https://emsa.europa.eu/publications/reports/item/4266-annual-overview-of-marine-casualties-and-incidents-2020.html>.
2. International Maritime Organization. *Maritime cyber risk management in safety management systems* (Resolution MSC.428(98)). 2017. [https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Security/Documents/Resolution%20MSC.428\(98\).pdf](https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Security/Documents/Resolution%20MSC.428(98).pdf).
3. UK Marine Accident Investigation Branch. *Annual report: Marine accident recommendations and statistics*. 2022. <https://www.gov.uk/government/publications/maib-annual-report-2022>.
4. The White House. *Presidential Policy Directive 21: Critical infrastructure security and resilience*. 2013. <https://obamawhitehouse.archives.gov/the-press-office/2013/02/12/presidential-policy-directive-critical-infrastructure-security-and-resilience>.
5. Allianz Global Corporate & Specialty. *Shipping safety review*. 2023. <https://www.agcs.allianz.com/news-and-insights/reports/shipping-safety.html>.
6. Aven T. Risk assessment and risk management: Review of recent advances on their foundations. *European Journal of Operational Research*, 253(1), 1–13. 2016. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2015.12.023>.
7. Jain P., Pasman H., Waldram S., & Mannan M. S. Process Resilience Analysis Framework (PRAF): A systems approach for improved risk and safety management. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 53, 61–73. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2017.08.006>.
8. Mokhor V., Bakalynskyi O., Bohdanov O., & Tsurkan V. Interpretation of the simple risk level dependence of its implementation in the terms of analytic geometry. *Information Technology and Security*, 5(1), 71–82. 2017. <https://doi.org/10.20535/2411-1031.2017.5.1.120574>.
9. Perederyi V., Borchik E., & Ohnieva O. Information technology for decision making support and monitoring in man–machine systems for managing complex technical objects of critical application. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 1246, 448–466. 2021. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-54215-4\\_43](https://doi.org/10.1007/978-3-030-54215-4_43).
10. Perederyi V., & Borchik E. Information technology for determination, assessment and correction of functional sustainability of the human operator in critical application systems. In *Theoretical and practical aspects of the development of modern science* (pp. 490–509). 2019. Baltija Publishing. [https://doi.org/10.30525/978-9934-571-78-7\\_57](https://doi.org/10.30525/978-9934-571-78-7_57).
11. Eling M., & Wirfs J. What are the actual costs of cyber risk events? *European Journal of Operational Research*, 272(3), 1109–1119. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2018.07.021>.

12. Maritime Executive. *The importance of psychological safety precautions in maritime*. 2023. <https://maritime-executive.com/blog/the-importance-of-psychological-safety-precautions-in-maritime>.
13. Li P., Dai L., & Li X.-F. Study on operator's situation awareness reliability in digital NPPs. Part 1. *Annals of Nuclear Energy*, 102, 168–178. 2016. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2016.12.011>.
14. Havlikova M., Jirgl M., & Bradac Z. Human reliability in man-machine systems. *Procedia Engineering*, 100, 1207–1214. 2015. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.01.485>.
15. Pasko N., & Viunenko O. Modeling human-machine interaction in information processing and management systems. *European Science*, sge17-02, 6–52. 2023. <https://doi.org/10.30890/2709-2313.2023-17-02-027>.
16. Alali M., Almogren A., Mehedi H., et al. Improving risk assessment model of cyber security using fuzzy logic inference system. *Computers & Security*, 74, 323–339. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.cose.2017.09.011>.
17. Mygal G., & Mygal V. Interdisciplinary approach to the human factor problem. *Municipal Economy of Cities*, 3, 149–157. 2020. <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2020-3-156-149-157>.
18. Perederyi V., Borchik E., Zosimov V., & Bulgakova O. Evaluation of the influence of environmental factors and cognitive parameters on decision-making in human-machine systems. *Radio Electronics, Computer Science, Control*, 1, 77–84. 2024. <https://doi.org/10.15588/1607-3274-2024-1-7>.
19. Perederyi V., Borchik E., Lytvynenko V., & Ohnieva O. Information technology for performance assessment of complex multilevel systems. *CEUR Workshop Proceedings*, 2805, 175–188. 2020. <http://ceur-ws.org/Vol-2805/>.
20. Perederyi V., Borchik E., Wójcik W. & Ohnieva O. Assessment and information security provision of the decision support process. 2021. *CEUR Workshop Proceedings*, 3101, 322–334. <http://ceur-ws.org/Vol-3101/>.
21. Murphy K. P. *A brief introduction to graphical models and Bayesian networks* (Technical Report 2001-5-10). University of British Columbia. 2001. <https://www.cs.ubc.ca/~murphyk/Bayes/bnintro.pdf>.
22. Parasyuk I. N., & Verevka O. V. Mathematical foundations of probabilistic estimation in fuzzy Bayesian belief networks. *Cybernetics and System Analysis*, 52(2), 62–67. 2016. <https://doi.org/10.1007/s10559-016-9816-3>.

## REFERENCES

1. European Maritime Safety Agency (2020). *Annual overview of marine casualties and incidents 2020*. <https://emsa.europa.eu/publications/reports/item/4266-annual-overview-of-marine-casualties-and-incidents-2020.html>
2. International Maritime Organization (2017). *Maritime cyber risk management in safety management systems* (Resolution MSC.428(98)). [https://www.wcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Security/Documents/Resolution%20MSC.428\(98\).pdf](https://www.wcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Security/Documents/Resolution%20MSC.428(98).pdf).
3. UK Marine Accident Investigation Branch (2022). *Annual report: Marine accident recommendations and statistics*. <https://www.gov.uk/government/publications/maib-annual-report-2022>
4. The White House (2013). *Presidential Policy Directive 21: Critical infrastructure security and resilience*. <https://obamawhitehouse.archives.gov/the-press-office/2013/02/12/presidential-policy-directive-critical-infrastructure-security-and-resilience>.
5. Allianz Global Corporate & Specialty (2023). *Shipping safety review*. <https://www.agcs.allianz.com/news-and-insights/reports/shipping-safety.html>.

6. Aven, T. (2016). Risk assessment and risk management: Review of recent advances on their foundations. *European Journal of Operational Research*, 253(1), 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2015.12.023>.
7. Jain, P., Pasman, H., Waldram, S., & Mannan, M. S. (2018). Process Resilience Analysis Framework (PRAF): A systems approach for improved risk and safety management. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 53, 61–73. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2017.08.006>.
8. Mokhor, V., Bakalynskiy, O., Bohdanov, O., & Tsurkan, V. (2017). Interpretation of the simple risk level dependence of its implementation in the terms of analytic geometry. *Information Technology and Security*, 5(1), 71–82. <https://doi.org/10.20535/2411-1031.2017.5.1.120574>.
9. Perederyi, V., Borchik, E., & Ohnieva, O. (2021). Information technology for decision making support and monitoring in man–machine systems for managing complex technical objects of critical application. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 1246, 448–466. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-54215-4\\_43](https://doi.org/10.1007/978-3-030-54215-4_43).
10. Perederyi, V., & Borchik, E. (2019). Information technology for determination, assessment and correction of functional sustainability of the human operator in critical application systems. In *Theoretical and practical aspects of the development of modern science* (pp. 490–509). Baltija Publishing. [https://doi.org/10.30525/978-9934-571-78-7\\_57](https://doi.org/10.30525/978-9934-571-78-7_57).
11. Eling, M., & Wirfs, J. (2019). What are the actual costs of cyber risk events? *European Journal of Operational Research*, 272(3), 1109–1119. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2018.07.021>.
12. Maritime Executive. (2023). *The importance of psychological safety precautions in maritime*. <https://maritime-executive.com/blog/the-importance-of-psychological-safety-precautions-in-maritime>.
13. Li, P., Dai, L., & Li, X.-F. (2016). Study on operator's situation awareness reliability in digital NPPs. Part 1. *Annals of Nuclear Energy*, 102, 168–178. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2016.12.011>.
14. Havlikova, M., Jirgl, M., & Bradac, Z. (2015). Human reliability in man–machine systems. *Procedia Engineering*, 100, 1207–1214. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.01.485>.
15. Pasko, N., & Viunenko, O. (2023). Modeling human–machine interaction in information processing and management systems. *European Science*, sge17-02, 6–52. <https://doi.org/10.30890/2709-2313.2023-17-02-027>.
16. Alali, M., Almogren, A., Mehedi, H., et al. (2018). Improving risk assessment model of cyber security using fuzzy logic inference system. *Computers & Security*, 74, 323–339. <https://doi.org/10.1016/j.cose.2017.09.011>.
17. Mygal, G., & Mygal, V. (2020). Interdisciplinary approach to the human factor problem. *Municipal Economy of Cities*, 3, 149–157. <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2020-3-156-149-157>.
18. Perederyi, V., Borchik, E., Zosimov, V., & Bulgakova, O. (2024). Evaluation of the influence of environmental factors and cognitive parameters on decision-making in human–machine systems. *Radio Electronics, Computer Science, Control*, 1, 77–84. <https://doi.org/10.15588/1607-3274-2024-1-7>.
19. Perederyi, V., Borchik, E., Lytvynenko, V., & Ohnieva, O. (2020). Information technology for performance assessment of complex multilevel systems. *CEUR Workshop Proceedings*, 2805, 175–188. <http://ceur-ws.org/Vol-2805/>.
20. Perederyi, V., Borchik, E., Wójcik, W., & Ohnieva, O. (2021). Assessment and information security provision of the decision support process. *CEUR Workshop Proceedings*, 3101, 322–334. <http://ceur-ws.org/Vol-3101/>.
21. Murphy, K. P. (2001). *A brief introduction to graphical models and Bayesian networks* (Technical Report 2001-5-10). University of British Columbia. <https://www.cs.ubc.ca/~murphyk/Bayes/bnintro.pdf>.

22. Parasyuk, I. N., & Verevka, O. V. (2016). Mathematical foundations of probabilistic estimation in fuzzy Bayesian belief networks. *Cybernetics and System Analysis*, 52(2), 62–67. <https://doi.org/10.1007/s10559-016-9816-3>.

**Perederyi V., Borchik Eu.** INFORMATION TECHNOLOGY FOR THE ASSESSMENT AND SUPPORT OF FUNCTIONAL STABILITY OF WATER TRANSPORT VEHICLES

*The article is devoted to the development of methods and information technology tools for assessing and supporting the functional stability of water transport vehicles to ensure its fault tolerance and survivability based on the interaction of a set of safety indicators and human factor indicators in control and decision-making processes at each of its hierarchical levels. An analysis of research in the field of developing methods and tools as well as their practical application for ensuring the stability of water transport vehicles has been conducted. It has been revealed that currently, a promising direction of scientific research is the development of methods, tools, and information technologies for assessing, monitoring and supporting both the technical and safety states of water transport vehicles and the information and cognitive parameters of the human factor in real time. It has been proven that an important aspect of the successful application of these methods is not only their use in adaptive decision support systems (DSS) for making relevant safety decisions, but also the development of a theory of functional stability, which should be based on modern principles of hybrid intelligence – the symbiotic integration of the functionalities of artificial and natural intelligence. An information-logical model has been developed, and an expert assessment has been carried out according to the degree of importance of a set of stability and safety indicators characterizing fault tolerance and survivability, and indicators of information-cognitive parameters of the human factor that affect the functional stability of a water transport vehicle have been determined. Depending on the state of the specified indicators, a fuzzy Bayesian trust network has been constructed, with the help of which, based on the knowledge of experts, a comprehensive assessment of the probability of the functional stability states of the water transport vehicle has been performed. The practical implementation of the proposed method has been carried out, the results obtained have confirmed its practical value, which can be applied to assess and ensure the comprehensive functional stability of the vehicle. A promising direction for further research is the development of methods and tools for adaptive information technology, which should possess the capability to reconfigure parameters and adapt to changes in internal and external operating conditions to ensure the functional stability of water transport vehicles.*

**Key words:** information technology; decision support systems; functional stability; water transport; information and cognitive parameters; hybrid intelligence; information and logical model; mathematical model; human factor.

© Передерій В. І., Борчик Є. Ю.

Статтю прийнято до редакції 24.11.2025