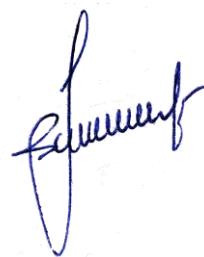


МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ОДЕСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ МОРСЬКИЙ УНІВЕРСИТЕТ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ОДЕСЬКА МОРСЬКА АКАДЕМІЯ»

НОСОВ Павло Сергійович



УДК 656.6.052:656.6.08

**НАУКОВО-МЕТОДОЛОГІЧНІ ОСНОВИ УПРАВЛІННЯ
ЕРГАТИЧНИМИ СИСТЕМАМИ НАВІГАЦІЙНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ**

Спеціальність 05.22.13 – навігація та управління рухом

РЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Одеса – 2026

Дисертацією є рукопис.

Дисертація виконана в Херсонській державній морській академії та в Одеському національному морському університеті.

Робота виконана самостійно.

Офіційні опоненти: **БУРМАКА Ігор Олексійович**, доктор технічних наук, професор, директор навчально-наукового інституту навігації Національного університету «Одеська морська академія» МОН України;

ТРИСТАН Андрій Вікторович, доктор технічних наук, професор, начальник центрального управління військової освіти і науки ГШ ЗС України;

ШМЕЛЬОВА Тетяна Федорівна, доктор технічних наук, професор, професор кафедри аеронавігаційних систем Державного університету «Київський авіаційний інститут» МОН України

Захист відбудеться 27 жовтня 2026 року о 10-й годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 41.106.01 в Національному університеті «Одеська морська академія» за адресою: 65052, м. Одеса, вул. Дідріхсона, 8, корпус 1, зала засідань вченої ради.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Національного університету «Одеська морська академія» за адресою: 65052, м. Одеса, вул. Дідріхсона, 8, та за електронною адресою: <https://onma.edu.ua/zakhist-dissertatsiy>

Реферат розісланий 18 вересня 2026 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради,
д.т.н., професор



Нікольський В.В.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми дослідження. Сучасне судноплавство розвивається в умовах інтенсифікації транспортних потоків, ускладнення навігаційної обстановки, зростання щільності руху у прибережних, портових акваторіях, протоках та поширення автоматизованих і інтелектуальних засобів керування рухом суден. За цих умов безпека мореплавства визначається не лише технічним рівнем окремих навігаційних засобів, а й узгодженістю функціонування інформаційної системи навігаційного забезпечення (ІСНЗ), під якою у роботі розуміється цілісна система взаємодії оператора-судноводія, навігаційної інформації, технічних засобів спостереження, аналітичних процедур, засобів підтримки прийняття рішень і режимів керування. У цьому контексті ергатична система навігаційного забезпечення розглядається як багатокомпонентний інформаційно-керуючий контур, у якому стан оператора, навігаційно-інформаційне середовище та регламентно-ситуаційні обмеження визначають безпечність руху.

Аналіз аварійності морського транспорту підтверджує стійку значущість людського фактора у причинній структурі морських ситуацій. За даними EMSA за 2015–2024 рр., найбільшу частку аварійних подій становлять дії людини – 57,7 %, тоді як відмови систем або обладнання становлять лише 25,9 %. У структурі сприяючих чинників морських аварій домінує поведінка людини – 50,5 %, а узагальнена частка чинників, пов'язаних із людським фактором, досягає 78,8 %. Найбільш ризикованими залишаються внутрішні води, портові райони, протоки та акваторії із щільним рухом, де оператор діє за умов дефіциту часу, інформаційного перевантаження, обмеженого простору для маневрування та необхідності взаємодії з іншими суднами, лоцманами, VTS і електронними засобами навігаційного забезпечення.

Впровадження AIS, ECDIS, RADAR/ARPA, GNSS, VTS, систем підтримки прийняття рішень і засобів автоматизованого керування створює передумови для підвищення безпеки мореплавства, однак водночас збільшує складність інформаційного середовища для оператора. У критичних ситуаціях багатоканальність даних може спричиняти перевантаження уваги, часову напруженість, дисторсію суб'єктивного часу, помилкове ранжування небезпек і несвоєчасний вибір маневру. Тому людський фактор доцільно розглядати не як зовнішню причину помилки, а як внутрішній функціональний параметр ІСНЗ, що впливає на повноту сприйняття навігаційної ситуації, швидкість реакції, стійкість операторської діяльності та інтегральний рівень ризику.

До вирішення питань підвищення безпеки судноводіння, розвитку навігаційних інформаційних систем, автоматизованого керування рухом суден, систем підтримки прийняття рішень, аналізу AIS/ECDIS-даних і врахування людського фактора присвячені дослідження Бурмаки І. О., Вагуценка Л. Л., Ворохобіна І. І., Мельника О. М., Онищенка О. А., Піпченка О. Д., Тихонова І. В., Цимбала М. М., Петрова І. М., Зінченка С. М., Беня А. П., Поповича І. С., Lützhöft M., Chauvin C., Weintrit A., Negenborn R. R., Yang Z., Wang J., Pietrzykowski Z., Tsou M.-C., Goerlandt F., Brčić D., Žuškin S. Разом з тим, наявні підходи здебільшого розглядають окремі технічні, інформаційні, ризикові або психологічні аспекти проблеми та не формують завершеної методології, у якій людський фактор виступає вимірюваним, ідентифікованим і керованим параметром ергатичної ІСНЗ.

Таким чином, наукова проблема зумовлена протиріччям між необхідністю підвищення безпеки, стійкості, оперативності та ефективності управління рухом судна і недостатньою формалізацією когнітивних, часових, поведінкових й психофізіологічних характеристик оператора в моделях навігаційного забезпечення. Розв'язання цього протиріччя потребує вирішення науково-технічної **проблеми** підвищення навігаційної безпеки та безпеки сучасного судноводіння, що досягається шляхом застосування уперше запропонованих та удосконалених існуючих моделей і методів, які забезпечують перехід від техноцентричного вдосконалення окремих засобів навігації до управління інформаційними полями навігаційного забезпечення як цілісною ергатичною схемою «оператор – інформація – ризик – рішення – режими управління рухом».

Гіпотеза дослідження полягає в тому, що підвищення адаптивності, достовірності, стійкості та ефективності ергатичних систем навігаційного забезпечення може бути досягнуте шляхом формалізованого включення параметрів людського фактора до моделей інтелектуальної обробки навігаційної інформації, оцінювання ризиків, прогнозування операторських дій та підтримки прийняття рішень.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дослідження спрямоване на реалізацію Національної транспортної стратегії України на період до 2030 року, схваленої постановою Кабінету Міністрів України від 27 грудня 2024 р. № 1550, та Морської доктрини України на період до 2035 року, затвердженої постановою Кабінету Міністрів України від 7 жовтня 2009 р. № 1307.

Тема дисертаційної роботи пов'язана з виконанням підтверджених науково-дослідних робіт: «Створення високоточних інтелектуальних систем управління рухом морських суден військового та цивільного призначення», номер державної реєстрації 0117U002176; «Розробка програмних засобів для підвищення якості функціонування систем динамічного позиціонування морських суден», номер державної реєстрації 0119U100948; «Розробка новітніх моделей та програмних засобів для автоматизованих систем керування рухом морських суден цивільного та спеціального призначення», номер державної реєстрації 0121U109680; «Інформаційні системи управління та підтримки прийняття рішень щодо розвитку інфраструктури морських перевезень в умовах воєнного стану», номер державної реєстрації 0124U001164; «Розробка методів зниження впливу фактору людини в автоматизованих системах керування рухом судна», номер державної реєстрації 0125U001788.

Дослідження виконувалося на базі науково-дослідної лабораторії Херсонської державної морської академії «Розробка систем підтримки прийняття рішень, ергатичних та автоматизованих систем керування рухом судна», яку автор очолював відповідно до наказу від 27.08.2020 №168 у період з 01.11.2020 р. по 01.07.2025 р.

Результати зазначених НДР і лабораторних досліджень використано при розробленні моделей інтелектуальної обробки AIS/ECDIS-даних, ідентифікації станів оператора, оцінювання ризиків людського фактора, побудови інтелектуальних ергатичних систем навігаційного забезпечення та експертних систем підтримки рішень оператора.

Мета та завдання дослідження.

Метою дослідження є підвищення безпеки мореплавства шляхом розроблення науково-методологічних засад, моделей, методів і засобів оцінювання та управління

ризиками людського фактора в ергатичних системах навігаційного забезпечення на основі формалізації станів оператора, інтелектуальної обробки AIS/ECDIS-даних та адаптивної підтримки прийняття рішень у процесах управління рухом судна.

Досягнення поставленої мети зумовило необхідність вирішення таких взаємопов'язаних *задач*:

1. Визначення методологічних основ і принципів формування концептуальних моделей управління ергатичними системами навігаційного забезпечення, у межах яких оператор, інформаційне поле, технічні засоби, зовнішнє навігаційне середовище та режими керування розглядаються як взаємопов'язані елементи єдиного функціонального контуру;

2. Розроблення інтелектуальної технології обробки навігаційної інформації та прогнозування дій оператора на основі фрактального, епізодного і ризик-орієнтованого аналізу AIS/ECDIS-траєкторій;

3. Дослідження, розвиток і формалізація моделей ідентифікації когнітивних, часових, психофізіологічних і поведінкових станів оператора в процесах управління рухом судна;

4. Розроблення моделей, методів і процедур оцінювання та управління ризиками людського фактора в ергатичних системах навігаційного забезпечення;

5. Інтегральна експериментальна верифікація розроблених моделей, методів і механізмів управління ергатичними системами навігаційного забезпечення на AIS/ECDIS-даних, тренажерних сценаріях, LOG-файлах та на операторських і траєкторних індикаторах.

Об'єктом дослідження є ергатичні процеси управління навігаційним забезпеченням і рухом судна в умовах впливу людського фактора.

Предметом дослідження є моделі, методи та механізми формалізації станів і надійності оператора, інтелектуальної обробки траєкторних даних та адаптивної підтримки прийняття рішень у структурі управління ергатичними системами навігаційного забезпечення та управління рухом суден.

Методи дослідження. Для розв'язання поставлених завдань у дисертації використано методи системного аналізу та синтезу, математичного, структурного, інформаційного і ситуаційного моделювання, формалізації та уніфікації AIS/ECDIS-даних, фрактального, статистичного та ризик-орієнтованого аналізу, аналітичної геометрії, теорії автоматичного та оптимального управління, підтримки прийняття рішень, а також імітаційного, тренажерного й прикладного експерименту.

Наукова новизна дослідження визначається вирішенням основних наукових завдань. У процесі виконання дослідження отримано такі нові наукові результати.

Вперше:

- сформовано концептуально-методологічне забезпечення управління ергатичними системами навігаційного забезпечення, у якому оператор, інформаційне поле, технічні засоби, навігаційне середовище, регламентні обмеження, режими керування, запас стійкості та ризики людського фактора подано як взаємопов'язані компоненти єдиної схеми ІСНЗ, на відміну від існуючих підходів, де технічні, інформаційні, операторські та ризикові складові переважно розглядаються окремо;

- розроблено концептуальну систему інтелектуальної обробки AIS/ECDIS-траєкторій, яка забезпечує перетворення різноформатних навігаційних даних у

формалізований простір траєкторних ознак керувальної діяльності оператора на основі метричної нормалізації, епізодного подання локальних фрагментів руху, виділення мікроеваріативності та ризик-орієнтованої інтерпретації, на відміну від існуючих підходів, де AIS/ECDIS-дані здебільшого застосовуються для геометричного або статистичного опису руху;

- розроблено інформаційно-аналітичний підхід до експериментальної діагностики кваліфікаційно-поведінкових характеристик оператора, який інтегрує AIS/ECDIS-траєкторії, LOG-проходи, часові індикатори процесів керування та дані експертного оцінювання в єдину схему підтвердження результативності дій оператора, що дозволило виявляти критичні відхилення траєкторії руху судна та обґрунтовувати напрями їх попередження і корекції.

Удосконалено:

- концептуально-структурну модель інформаційного поля оператора в ІСНЗ шляхом формалізації зв'язків між оператором, навігаційною інформацією, технічними засобами, зовнішнім середовищем, регламентними обмеженнями та режимами керування, що дозволяє на практиці визначити місце людського фактора у механізмах сприйняття ситуації, прийняття рішень і адаптивного розподілу функцій.

- методи ідентифікації когнітивних, часових, психофізіологічних і поведінкових станів оператора шляхом поєднання моделей розподілу уваги, дисторсії суб'єктивного часу, антиципаційно-мотиваційних проявів, функціонального виснаження та просторово-часових патернів діяльності, що дає змогу розглядати стан оператора як змінний параметр ергатичної структури управління рухом судна.

- методи оцінювання та управління ризиками людського фактора шляхом інтеграції навігаційних, траєкторних, часових, поведінкових і ситуаційних ознак у єдину ризик-орієнтовану схему, яка спрямована на виявлення переходу ІСНЗ між стабільним, напруженим і критичним режимами та формування правил адаптивної підтримки або корекції керувальних дій у процесі управління рухом судна.

Отримали подальший розвиток:

- системний підхід до дослідження навігаційного забезпечення судна шляхом переходу від аналізу окремих технічних засобів, алгоритмів автоматизації та процедур підтримки рішень до оцінювання їх узгодженості з параметрами ІСНЗ для обґрунтування принципів системної узгодженості технічних, інформаційних, регламентних і операторських складових навігаційного забезпечення.

- методи фрактального аналізу траєкторій суден шляхом переходу від інтегрального опису траєкторії до локального аналізу мікроепізодів руху, фрактального кодування та формування сигнатур рейсу, що дозволило кількісно інтерпретувати мікроеваріативність руху як ознаку моделі маневрування, напруженості керування та навігаційного ризику;

- положення щодо формалізації людського фактора в управлінні рухом судна шляхом подання його не як зовнішньої причини помилки, а як внутрішнього вимірюваного параметра функціонування ІСНЗ, що дозволило включити людський фактор до процедур оцінювання, прогнозування та управління безпекою навігаційного забезпечення;

– принципи побудови інтелектуальних систем підтримки рішень та експертного аналізу шляхом інтеграції траєкторної обробки, візуалізації руху судна, сценарного моделювання та LOG-валідації в єдину схему підтвердження рішень, що на практиці обґрунтовує рекомендації та забезпечує достовірність експертного підтвердження навігаційних рішень у складних навігаційних умовах.

Практичне значення отриманих результатів полягає у придатності одержаних результатів для створення інтелектуальних ІСНЗ, систем підтримки прийняття рішень оператора, засобів аналізу AIS/ECDIS-даних, діагностики операторських станів, оцінювання ризиків людського фактора, автоматизованого керування рухом судна та тренажерної підготовки морських фахівців, що дозволяє підвищити безпеку судноплавства та ефективність функціонування ергатичних систем навігаційного забезпечення.

Результати дисертаційного дослідження застосовуються у навчальному процесі морських навчальних закладів при підготовці курсантів, підвищенні кваліфікації фахівців морської галузі, а також у тренажерній підготовці морських фахівців у спеціалізованих тренажерних центрах, а саме: освітньому процесі Херсонської державної морської академії (акт від 04.05.2026); при проведенні тренажерної підготовки морських фахівців в спеціалізованих морських тренажерних центрах – Херсонському морському спеціалізованому тренажерному центрі (від 07.05.2026 р.), Vilnius Gediminas Technical University Lithuanian Maritime Academy (від 01.05.2026 р.); ТОВ «БСК БОТС» (акт від 02.02.2026 р.); ТОВ «АНГЛО-ІСТЕРН УКРАЇНА» (акт від 14.05.2026 р.); State Enterprise “MARITIME SEARCH AND RESCUE SERVICE” (акт від 11.05.2026 р.); ТОВ "ЄВРО ГРАСКОР" (акт від 22.04.2026 р.); ТОВ «МАРІН ТЕХ СЕРВІС» (акт від 28.04.2026 р.).

Особистий внесок здобувача. Дисертаційну роботу здобувач виконав власноруч, без залучення співавторів. Теоретичні визначення, наукові результати і положення, наукові й практичні висновки та рекомендації, викладені у роботі та виносяться на захист, отримані автором особисто.

Апробація результатів дисертації. Основні положення і результати дисертаційного дослідження доповідалися, обговорювалися та були схвалені на 25 наукових заходах міжнародного та загальнодержавного рівня.

Публікації результатів дослідження. За результатами роботи опубліковано 65 наукових праць і об'єктів інтелектуальної власності. Зокрема, 39 публікацій опубліковано у наукових профільних виданнях, серед яких 23 публікації індексуються у базах даних Scopus та Web of Science, 16 статей – у наукових фахових виданнях України категорії Б. Також опубліковано 25 праць у збірниках наукових праць і матеріалах конференцій, з яких 3 індексуються у Scopus. За результатами дослідження отримано 1 патент України на корисну модель.

Обсяг і структура роботи. Дисертація складається з анотації, переліку прийнятих скорочень, вступу, шести розділів, загальних висновків, списку використаних джерел і додатків. Загальний обсяг дисертації без урахування додатків становить 512 сторінок, із них основний текст викладено на 436 сторінках. Робота містить 124 рисунки та 66 таблиць. Список використаних джерел складається з 357 найменувань.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми, зв'язок роботи з науковими програмами, планами і темами, сформульовано наукові протиріччя, робочу гіпотезу та логіку розв'язання проблеми, визначено мету й завдання дослідження, об'єкт, предмет і методи дослідження. Також розкрито наукову новизну, практичну цінність одержаних результатів, особистий внесок здобувача, наведено відомості про апробацію, публікації, обсяг і структуру дисертаційної роботи.

У **першому розділі** проведено аналітичний огляд проблеми та обґрунтовано напрям дослідження ергатичних систем навігаційного забезпечення в судноводінні. Розглянуто сучасний стан розвитку навігаційних інформаційних систем, засобів автоматизованого керування рухом суден, систем підтримки прийняття рішень, інтелектуальної обробки AIS/ECDIS-даних та людино-машинної взаємодії в умовах ускладнення навігаційного середовища. Визначено, що подальше підвищення безпеки судноплавства потребує переходу від техноцентричного вдосконалення окремих засобів навігації до цілісного управління інформаційною системою навігаційного забезпечення як ергатичним контуром «оператор – інформація – ризик – рішення – режим керування».

Узагальнену структуру ергатичної системи навігаційного забезпечення з урахуванням людського фактора наведено на рис. 1.



Рисунок 1. Узагальнена структура ергатичної системи навігаційного забезпечення з урахуванням людського фактора

Схема узагальнює логіку функціональної взаємодії компонентів ІСНЗ, що забезпечують формалізацію людського фактора та підтримку безпечного управління рухом судна. Також проаналізовано сучасні міжнародні підходи до врахування людського елемента в морській безпеці, зокрема положення ІМО А.1197(34), у яких людський фактор розглядається як системна багатовимірна категорія, пов'язана з діяльністю екіпажу, береговим управлінням, технічними засобами, процедурами, робочим навантаженням та організацією морської діяльності. На основі даних EMSA 2025 показано, що у 2015–2024 рр. найбільшу частку аварійних подій становили дії людини – 57,7 %, тоді як відмови систем або обладнання становили 25,9 %. У структурі сприяючих чинників домінує поведінка людини – 50,5 %, а узагальнена частка чинників, пов'язаних із людським елементом, досягає 78,8 % (рис. 2).

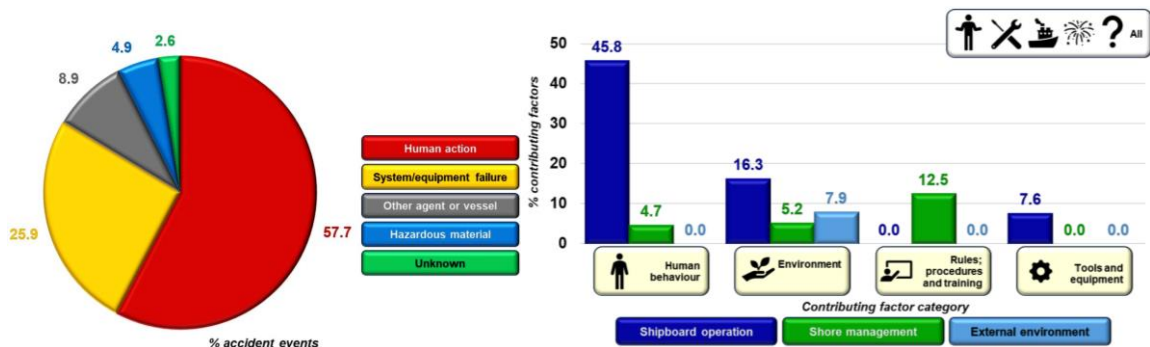


Рисунок 2. Розподіл типів аварійних подій у морських аваріях та інцидентах за даними EMSA 2025

Встановлено, що людський фактор у системах навігаційного забезпечення доцільно розглядати не лише як причину аварійності, а й як внутрішній параметр ІСНЗ, що проявляється через стан оператора, якість прийняття рішень, часову напруженість, розподіл уваги, поведінкові патерни, взаємодію з інформаційними засобами та динаміку навігаційного ризику. Розглянуто теоретичні засади ідентифікації когнітивних, часових, психофізіологічних та поведінкових станів оператора, зокрема уваги, втоми, дисторсії суб'єктивного часу, антиципаційних проявів, мотиваційних станів і функціонального виснаження.

Проаналізовано наукові підходи до фрактального, епізодного, статистичного та ризик-орієнтованого аналізу траєкторій суден, обробки AIS/ECDIS-даних, класифікації траєкторних патернів, виявлення мікрорухів судна, прогнозування дій оператора та оцінювання ризиків, пов'язаних із людським фактором. Визначено, що наявні дослідження здебільшого розглядають технічні, інформаційні, ризикові або психофізіологічні аспекти окремо, без їх повного поєднання в єдиній ергатичній моделі навігаційного забезпечення.

На підставі проведеного аналізу сформульовано наукові протиріччя, визначено методи дослідження, побудовано технологічну карту дисертації, виконано декомпозицію головного наукового завдання на головні та допоміжні завдання. Обґрунтовано основний напрям дослідження – розроблення науково-методологічних основ управління ергатичними системами навігаційного забезпечення з урахуванням людського фактора, інтелектуальної обробки AIS/ECDIS-даних, оцінювання ризиків та адаптивної підтримки прийняття рішень.

У **другому розділі** «Методологічні основи розвитку моделей і методів управління ергатичними системами навігаційного забезпечення» сформовано методологічну основу дослідження. Показано, що ІСНЗ має розглядатися як ергатичний контур, у якому оператор, інформаційне поле, технічні засоби, навігаційне середовище, режими керування та показники безпеки функціонують як взаємопов'язані складові.

Показано, що безпека ІСНЗ визначається не лише точністю технічних засобів, а і узгодженістю інформаційного поля оператора, його операторського стану, зовнішніх збурень, регламентних обмежень і режимів керування. Це дозволило подати людський фактор як внутрішній параметр ергатичної системи.

На рисунку 3 подано інформаційне поле оператора як функціональний центр ІСНЗ. Воно інтегрує дані ECDIS, AIS, РЛС, GNSS, VTS, метеорологічну інформацію,

вимоги COLREG, Bridge SOP, процедури порту та компанії. На цій основі формується ситуаційна обізнаність, оцінюється ризик і обирається режим керування рухом судна.

У роботі сформульовано аналогово-індикаторну модель стійкості ІСНЗ (рис. 4). Для опису нормативно-ситуаційного впливу введено умовний вектор нормативної «гравітації»: $g_N(t) = G(t)e_z$, де $G(t)$ – нормований інтегральний індикатор нормативно-ситуаційного впливу; e_z – одиничний вектор експертно заданого напрямку безпечного функціонування системи. Для оцінювання частоти потреби у коригувальних перебудовах використано індикатор: $\Omega_{сист} \approx \frac{\tau_{сист}}{I_{3,сист} \cdot \omega_{3,сист}}$, де $\tau_{сист}$ – сумарна збурювальна напруженість; $I_{3,сист}$ – структурно-функціональна зрілість системи; $\omega_{3,сист}$ – операційний ритм її функціонування.



Рисунок 3. Концептуально-структурна модель інформаційного поля оператора в ергатичній системі навігаційного забезпечення

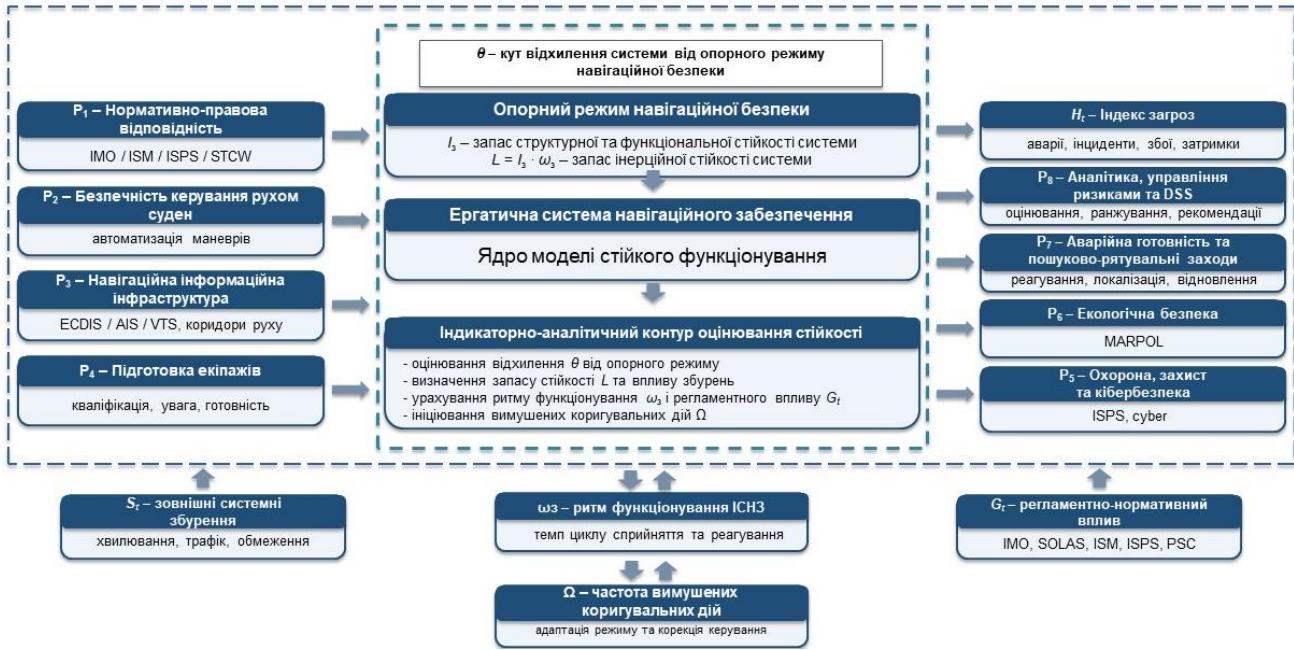


Рисунок 4. Аналогово-індикаторна модель стійкості та керованої динаміки ергатичної системи навігаційного забезпечення

З урахуванням функціональних сегментів P_1 – P_8 сформовано задачу коригування параметрів ергатичної системи:

$$\min_{\Delta p^{(s)}} \left\| W \left(B \Delta p^{(s)} - \Delta x^{(s)} \right) \right\|_2^2, \quad \Delta x^{(s)} = x^* - x^{(s)}, \quad -p_i^{(s)} \leq \Delta p_i^{(s)} \leq 1 - p_i^{(s)}, \quad i = 1, \dots, 8, \quad (1)$$

де B – матриця впливу сегментів на макропараметри моделі; W – матриця пріоритетів; $\Delta p^{(s)}$ – вектор рекомендованих змін; $\Delta x^{(s)}$ – бажаний зсув параметрів до референтного стану.

Після коригування виконується повторний розрахунок запасу стійкого функціонування:

$$\omega_3^{new} = \omega_3^{(s)} + \Delta \omega_3^{(s)}, \quad I_3^{new} = I_3^{(s)} + \Delta I_3^{(s)}, \quad L^{new} = I_3^{new} \cdot \omega_3^{new}. \quad (2)$$

Сценарний розрахунок показав, що за прийнятих експертних припущень модель дає змогу оцінити поточний стан ІСНЗ і визначити напрям його керованого відновлення. Операційна криза та зовнішній шок характеризуються недостатнім запасом стійкого функціонування і підвищеною частотою коригувальних перебудов. Після застосування рекомендованих коригувань за заданого спільного референтного стану сценарії наближаються до умовно стійкого збалансованого режиму (рис. 5).

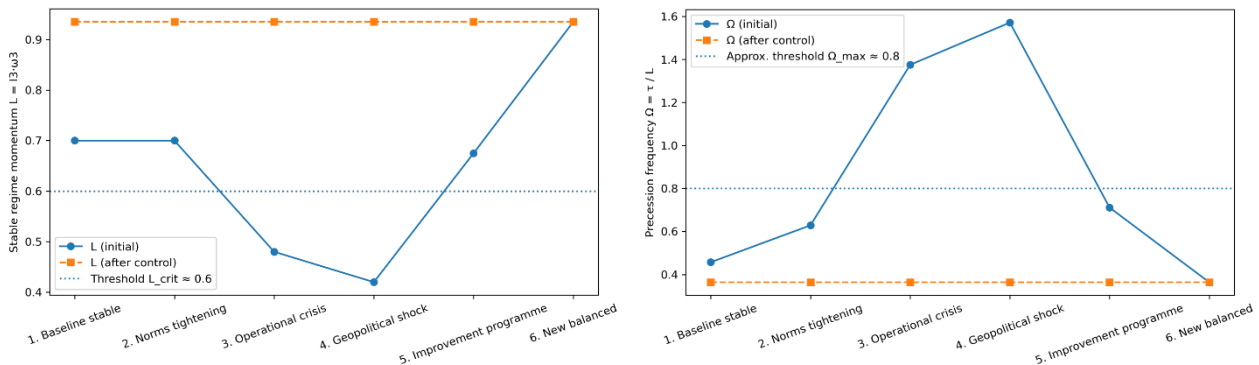


Рисунок 5. Графіки індикаторів запасу стійкого функціонування L та частоти коригувальних перебудов Ω

Сформовано схему формалізації та уніфікації навігаційних ІСНЗ-даних. Загальний стан ергатичної системи подано як: $\mathcal{E}(t) = \langle X_O(t), X_V(t), X_N(t), X_R(t) \rangle$, де $X_O(t)$ – стан оператора; $X_V(t)$ – стан судна; $X_N(t)$ – стан навігаційно-інформаційного середовища; $X_R(t)$ – регламентні, процедурні та ситуаційні обмеження.

Перехід від початкових ІСНЗ-даних до стандартизованого ряду визначено як: $F^{(k)} \rightarrow S^{(k)}$, де $F^{(k)}$ – початковий ІСНЗ-файл k -го проходу; $S^{(k)}$ – стандартизований часово-просторовий ряд.

У загальному вигляді цей ряд подано як:

$$S^{(k)} = \left\{ (t_i, x_i, y_i, COG_i, ROT_i, XTE_i) \right\}_{i=1}^{N_k}. \quad (3)$$

Показано, що така уніфікація перетворює різномірні AIS/ECDIS-записи на єдиний простір траєкторних і кінематичних ознак. У цьому просторі траєкторія набуває операторського змісту і стає основою для подальшого фрактально-епізодного аналізу.

Визначено принципи інтеграції когнітивних і психофізіологічних станів оператора в контур управління. Оцінений стан оператора використовується як модифікатор ризику та параметр адаптації СППР.

Оцінювання стану оператора подано як: $\hat{X}_O(t) = \mathcal{D}(B_{obs}(t), Q_{phys}(t), W_{ctx}(t))$, де $B_{obs}(t)$ – поведінкові й траєкторні ознаки; $Q_{phys}(t)$ – психофізіологічні показники; $W_{ctx}(t)$ – характеристики навігаційної ситуації та інформаційного навантаження.

Формальний зв'язок ідентифікованого стану оператора визначено як: $\hat{X}_O(t) \rightarrow k_H(t) \rightarrow R_H(t) \rightarrow DSS(t)$, де $k_H(t)$ – коефіцієнт модифікації ризику; $R_H(t)$ – ризик людського фактора; $DSS(t)$ – адаптована конфігурація системи підтримки прийняття рішень.

Для підвищення достовірності оцінювання використано принцип багатоканальної верифікації:

$$Conf(\hat{X}_O) = f(B_{traj}, B_{time}, B_{in}, Q_{phys}, W_{context}). \quad (4)$$

Показано, що окремий проху-індикатор не є достатньою підставою для висновку щодо стану оператора. Оцінювання має формуватися на основі узгодженості траєкторних, часових, психофізіологічних і контекстних ознак.

У **третьому** розділі «Теоретичне обґрунтування фрактально-епізодного аналізу та моделювання обробки ІСНЗ-траєкторій для виділення індикаторів мікроеваріативності керування судном» розроблено формалізований апарат інтелектуальної обробки AIS/ECDIS-даних. Розділ безпосередньо розкриває завдання дослідження, пов'язане з побудовою технології фрактального, епізодного і ризик-орієнтованого аналізу ІСНЗ-траєкторій.

Показано, що траєкторна реалізація руху судна є носієм просторово-часових індикаторів керування. Вихідні ІСНЗ-дані перетворено на стандартизований простір ознак, придатний для виявлення мікрокорекцій курсу, поперечних відхилень, локальної нерегулярності руху та епізодів підвищеної фрактальної активності. Зв'язок цих ознак із людським фактором має інтерпретаційний характер і не ототожнюється з прямою ідентифікацією дій або стану конкретного оператора.

На першому етапі задано множину траєкторних файлів:

$$\mathcal{F} = \left\{ F^{(k)} \right\}_{k=1}^K. \quad (5)$$

де $\mathcal{F}$ – множина вхідних траєкторних файлів; $F^{(k)}$ – k -й файл проходу судна або окремого фрагмента руху; K – загальна кількість файлів.

Формально файл проходу подано як прямокутну таблицю:

$$F^{(k)} = \left\{ z_{ij}^{(k)} \mid i = 1, \dots, N_k, j = 1, \dots, M_k \right\}. \quad (6)$$

де $z_{ij}^{(k)}$ – значення елемента таблиці k -го файлу; i – номер запису у часовій послідовності; j – номер колонки; N_k – кількість записів у файлі; M_k – кількість інформаційних полів.

Типовий рядок такої таблиці має вигляд:

$$z_i^{(k)} = (Time_i, Lat_i, Lon_i, COG_i, SOG_i, \dots) \quad (7)$$

де $Time_i$ – часовий штамп; Lat_i, Lon_i – широта і довгота; COG_i – курс над ґрунтом; SOG_i – швидкість над ґрунтом.

Метою нормалізації є побудова відображення: $F^{(k)} \rightarrow S^{(k)}$.

Стандартизований часово-просторовий ряд подано як:

$$S^{(k)} = \left\{ (t_i, x_i, y_i, COG_i, ROT_i, XTE_i) \right\}_{i=1}^{N_k^*} \quad (8)$$

де $S^{(k)}$ – нормалізований ряд k -го проходу; t_i – відносний час; x_i, y_i – координати у локальній декартовій системі; ROT_i – кутова швидкість повороту; XTE_i – поперечне відхилення від згладженої або опорної траєкторії; N_k^* – кількість записів після нормалізації.

Показано, що нормалізація забезпечує єдине координатне, часове та кінематичне подання траєкторії. Фактичні відносні часові мітки зберігаються як основна шкала аналізу, а медіанний крок дискретизації використовується як номінальний параметр контролю регулярності даних, вибору довжини ковзного вікна та виявлення пропусків.

Якщо курс у файлі відсутній, він обчислюється за координатними похідними:

$$\dot{x}_i = \frac{dx_i}{dt}, \dot{y}_i = \frac{dy_i}{dt}, COG_i = \left(\frac{180}{\pi} \arctan 2(\dot{x}_i, \dot{y}_i) + 360 \right) \bmod 360 \quad (9)$$

Для усунення розривів поблизу межі $0^\circ/360^\circ$ виконується розгортання курсу:

$$COG_i^u = unwrap(COG_i) \quad (10)$$

Кутова швидкість повороту визначається як похідна розгорнутого курсу за часом:

$$ROT_i \approx \frac{dCOG_i^u}{dt}.$$

У дискретному вигляді для внутрішніх точок ряду використано центральну різницю:

$$ROT_i \approx \frac{COG_{i+1}^u - COG_{i-1}^u}{2\Delta t}, \text{ де } COG_i^u \text{ – розгорнутий курс; } dx_i/dt, dy_i/dt \text{ – похідні координат}$$

за часом; Δt – крок дискретизації. Отримані співвідношення забезпечують перехід від координатної траєкторії до кінематичного опису керувальної активності судна.

Для оцінювання локальної нерегулярності траєкторного сигналу використано фрактальну розмірність Higuchi. Для кожної підпослідовності оцінюється довжина ламаної:

$$L_m(k) = \frac{N-1}{\left\lfloor \frac{N-m}{k} \right\rfloor} \sum_{j=1}^{\left\lfloor \frac{N-m}{k} \right\rfloor} |x_{m+jk}^{sig} - x_{m+(j-1)k}^{sig}|. \quad (11)$$

Середня довжина для масштабу k визначається як: $L(k) = \frac{1}{k} \sum_{m \in \mathcal{M}_k} L_m(k)$.

За наявності фрактальної структури ряду виконується залежність:

$$\ln L(k) \approx \ln C - D_H \ln k.$$

Оцінка фрактальної розмірності Higuchi визначається як модуль кутового коефіцієнта лінійної регресії:

$$\hat{D}_H = -\hat{\beta}_1, \quad (\hat{\beta}_0, \hat{\beta}_1) = \arg \min_{\beta_0, \beta_1} \sum_k (\ln L(k) - \beta_0 - \beta_1 \ln k)^2, \quad (12)$$

де x_i^{sig} – скалярний ряд *COG*, *ROT* або *XTE*; N – довжина ряду; k – масштаб; m – початковий зсув; $L_m(k)$ – довжина ламаної для підпоследовності; $L(k)$ – середня довжина для цього масштабу; D_H – фрактальна розмірність Higuchi.

Показано, що Higuchi FD є чутливим до локальної «ламаності» траєкторного сигналу. Для доповнення геометричної оцінки нерегулярності використано DFA-показник:

$$F(s) = \sqrt{\frac{1}{n_s s} \sum_{v=1}^{n_s} \sum_{j=1}^s \varepsilon_v^2(j)}. \quad (13)$$

За наявності самоподібної структури: $F(s) \sim s^\alpha$, де $F(s)$ – функція флуктуацій; s – масштаб аналізу; $n_s s$ – кількість сегментів; $\varepsilon_v^2(j)$ – залишок після вилучення локального тренду; α – DFA-показник.

Додатково використано фрактальну розмірність Katz. Спочатку визначається довжина траєкторії у просторі сигналу: $L = \sum_{i=2}^N |x_i^{sig} - x_{i-1}^{sig}|$.

Фрактальна розмірність Katz задається співвідношенням:

$$D_K = \frac{\log_{10} N}{\log_{10} N + \log_{10} \left(\frac{d}{L} \right)}, \quad (14)$$

де D_K – фрактальна розмірність Katz; d – максимальна відстань від початкової точки до будь-якої іншої точки ряду; решта позначень визначена вище.

Порівняльний аналіз показав, що Higuchi FD, DFA та Katz FD відображають різні аспекти складності траєкторії сигналу. Це обґрунтовує багатопоказниковий характер запропонованого методу.

На основі фрактальних метрик сформовано локальне ковзне поле ознак (рис. 6):

$$\mathbf{W}_f = \left\{ \left(t_{f,j}^{(0)}, D_{H,j}^{XTE}, \alpha_j^{XTE}, D_{K,j}^{XTE} \right) \right\}_{j=1}^{N_f} \approx \left\{ \left(t_{f,j}^{(0)}, H_{f,j}, \dots \right) \right\}_{j=1}^{N_f}, \quad (15)$$

де $\mathbf{W}_f$ – поле локальних ковзних показників для файлу f ; $t_{f,j}^{(0)}$ – початок j -го ковзного вікна; $H_{f,j}$ – локальні значення Higuchi FD; $D_{H,j}^{XTE}$, α_j^{XTE} , $D_{K,j}^{XTE}$ – локальні фрактальні показники для ряду XTE .

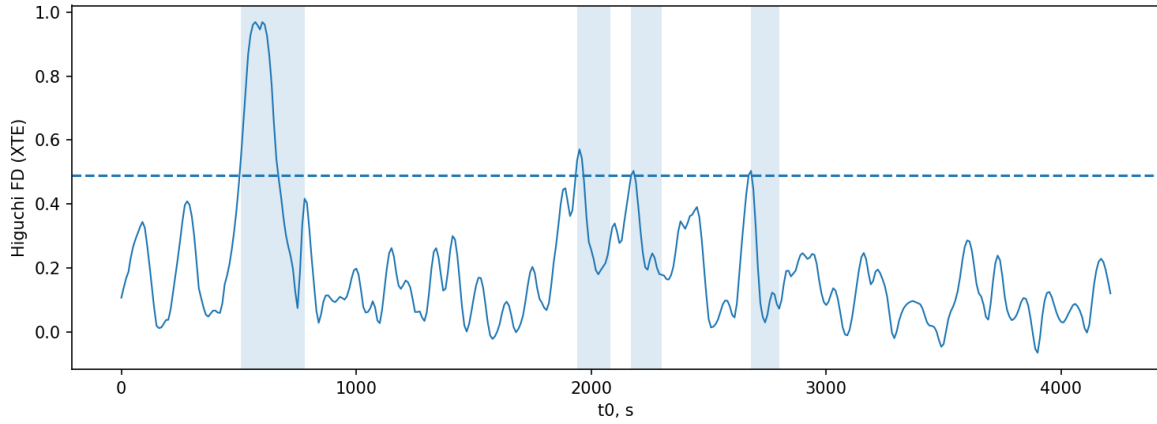


Рисунок 6. Приклад ковзної оцінки Higuchi FD для поперечного відхилення XTE у нормалізованій часовій шкалі

Доведено, що ковзне оцінювання дозволяє перейти від інтегрального опису рейсу до локального виявлення зон підвищеної мікроеваріативності (рис. 7).

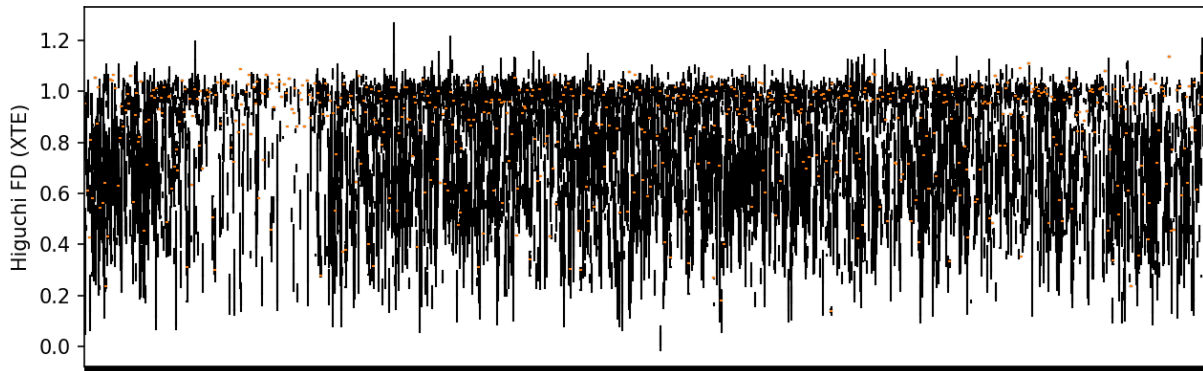


Рисунок 7. Розподіл ковзних значень Higuchi FD для ряду XTE по сукупності траєкторій

Отримані результати показали, що навіть після загальної нормалізації структура мікроеваріативності істотно відрізняється між рейсами. Це підтверджує необхідність не лише глобального, а й локального епізодного аналізу траєкторій.

Кореляційний аналіз продемонстрував, що фрактальні показники не є повністю взаємозамінними (рис. 8). Це свідчить про доцільність використання системи ознак, а не одного скалярного показника.

Для виділення фрактально активних фрагментів задано множину допустимих значень Higuchi FD:

$$\mathcal{H}_f = \{H_{f,j} \mid j = 1, \dots, N_f, H_{f,j} \text{ не NaN}\}. \quad (16)$$

Порогове значення визначено за квантилем: $T_f = \text{Quantile}_Q(\mathcal{H}_f)$.

Індикатор фрактально активного вікна має вигляд:

$$I_{f,j} = \begin{cases} 1, & H_{f,j} \geq T_f, \\ 0, & H_{f,j} < T_f. \end{cases} \quad (17)$$

де $\mathcal{H}_f$ – множина коректних локальних значень Higuchi FD; T_f – квантильний поріг; I_{fj} – бінарний індикатор активності j -го вікна.

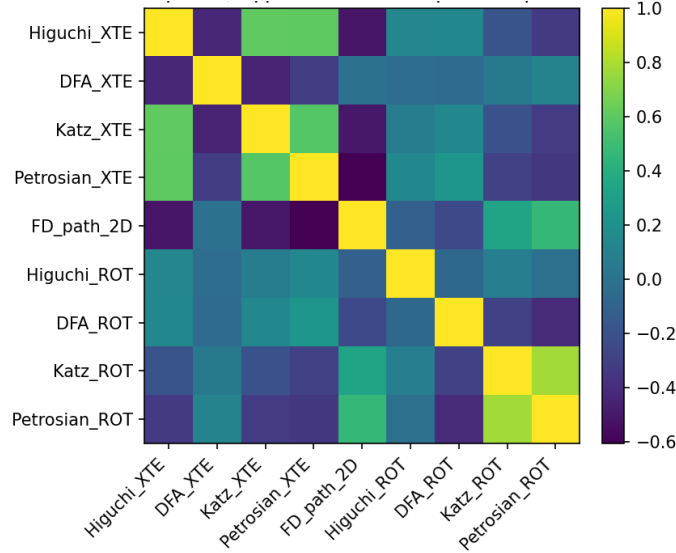


Рисунок 8. Кореляційна матриця глобальних фрактальних показників рейсу

За базового квантильного порога $Q = 0,95$ виділяється приблизно 5 % вікон із найбільшими значеннями локального фрактального показника в межах відповідного проходу. Такий підхід створює основу для епізодної інтерпретації.

Після агрегації активних вікон формується множина епізодів мікрорухів (рис. 9):

$$\mathcal{E}_f = \left\{ \varepsilon_{f,i} = \left(t_{f,i}^{start}, t_{f,i}^{end}, \mathcal{J}_{f,i} \right) \right\}_{i=1}^{E_f}. \quad (18)$$

Узагальнене подання епізоду визначено як:

$$\varepsilon_{f,i} = \left(t_{f,i}^{start}, t_{f,i}^{end}, X_{f,i}^{peak}, Y_{f,i}^{peak}, \mathcal{B}_{f,i} \right), \quad (19)$$

де $\mathcal{E}_f$ – множина епізодів мікрорухів; $\varepsilon_{f,i}$ – i -й епізод; $t_{f,i}^{start}$, $t_{f,i}^{end}$ – часові межі; $\mathcal{J}_{f,i}$ – підмножина ковзних вікон епізоду; $X_{f,i}^{peak}$, $Y_{f,i}^{peak}$ – координати пікової точки; $\mathcal{B}_{f,i}$ – набір фрактально-динамічних характеристик.

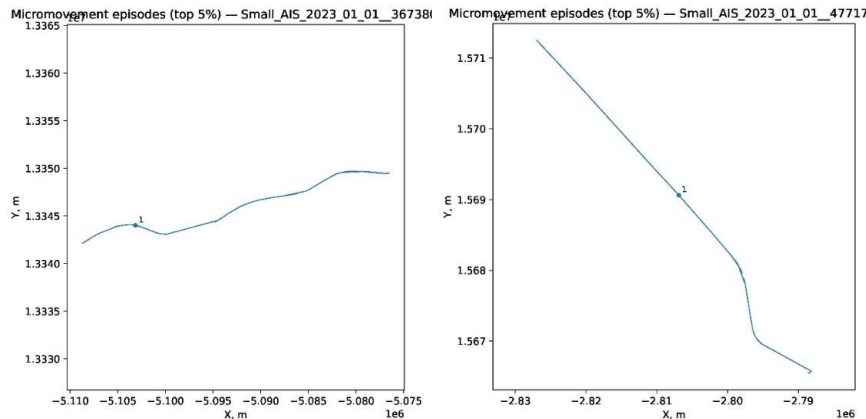


Рисунок 9. Просторова локалізація епізодів мікрорухів на траєкторії судна

Отримані результати продемонстрували, що епізоди підвищеної фрактальної активності мають конкретну просторову прив'язку до ділянок маршруту. Це дає змогу локалізувати фрагменти підвищеної мікроеваріативності руху та зіставляти їх із геометрією шляху, навігаційним контекстом і зовнішніми умовами керування (рис. 10).

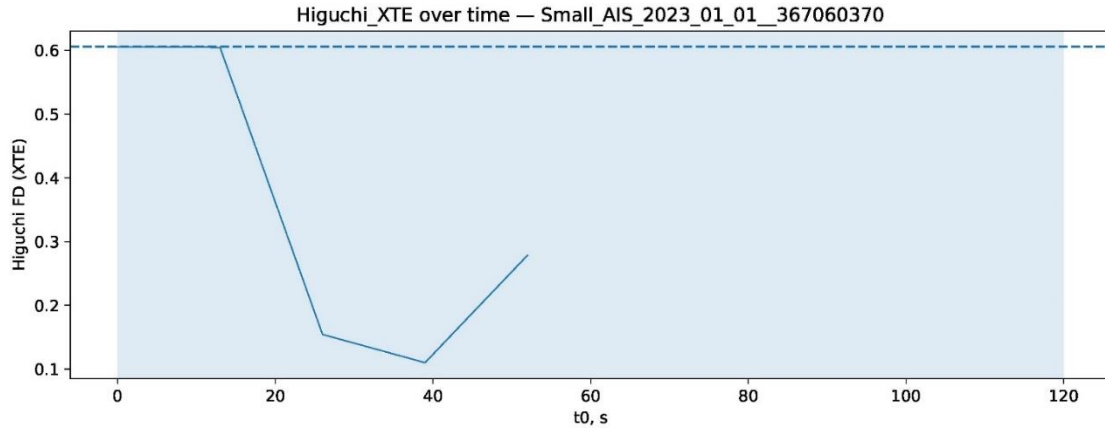


Рисунок 10. Епізоди мікрорухів у полі значень Higuchi FD для обраних рейсів

Показано, що виділені епізоди не є ізольованими піками, а утворюють часово пов'язані фрагменти підвищеної фрактальної активності.

Для порівняння проходів різної довжини введено нормування за протяжністю шляху: $s_k = \sum_{l=1}^{k-1} \sqrt{(X_{l+1} - X_l)^2 + (Y_{l+1} - Y_l)^2}$, $path_{NM} = \frac{L_f}{1852}$.

Щільність мікрорухів на одиницю довжини шляху визначено як:

$$\lambda_f = \frac{E_f}{L_f^{NM}}, \quad (20)$$

де s_k – накопичена довжина шляху; L_f – повна довжина проходу; $path_{NM}$, L_f^{NM} – довжина проходу в морських милях; λ_f – щільність епізодів; E_f – кількість епізодів у проході (рис. 11).

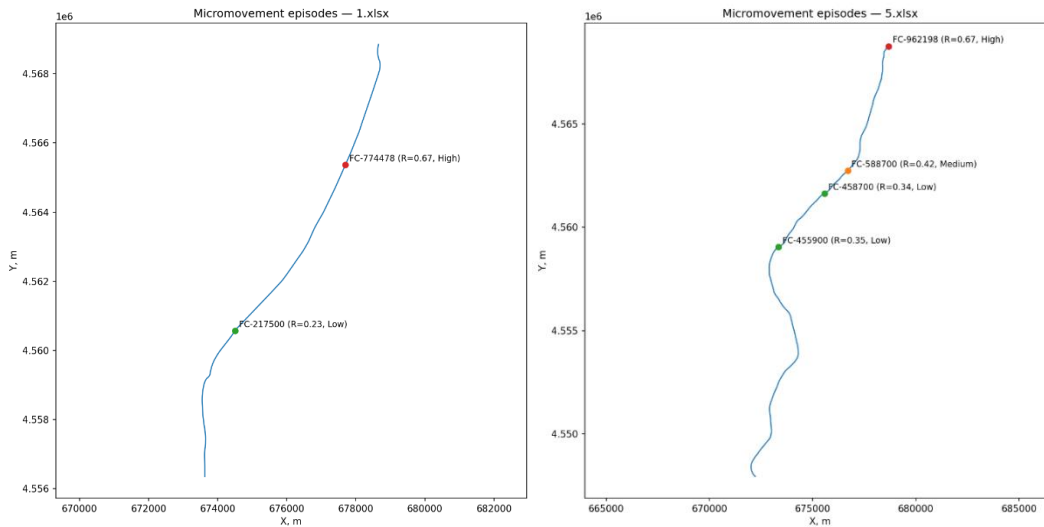


Рисунок 11. Траєкторії суден і пікові точки епізодів мікрорухів, позначені кольором відповідно до рангу епізодної складності Low/Medium/High, з підписами кодів FC-

$d_1 \dots d_6$ та значеннями $R_{f,i}^{tot}$.

Доведено, що λ_f характеризує просторову насиченість проходу мікроепізодами та дозволяє коректно порівнювати рейси різної протяжності.

Далі виконано фрактальне кодування епізодів. Кожен з них подано у вигляді допоміжної дискретної сигнатури типу FC- $d_1 \dots d_6$, сформованої шляхом децильного квантування шести базових фрактально-динамічних ознак. Цей код забезпечує компактне подання епізодів для порівняння, групування та ризик-орієнтованої інтерпретації.

Показано, що фрактальне кодування поєднує дискретний опис ознак, рангову категоризацію епізодної складності та просторову локалізацію особливостей руху судна.

Для інтегрального оцінювання проходу введено індекс траєкторної мікроеваріативності:

$$chaos_score(f) = \frac{\sum_{k=1}^9 a_k(f) w_k p_{k,norm}(f)}{\sum_{k=1}^9 a_k(f) w_k}, w_k \geq 0, \quad (21)$$

де $chaos_score(f)$ – індекс траєкторної мікроеваріативності проходу; $p_{k,norm}(f)$ – нормована компонента track-підпису; w_k – ваговий коефіцієнт; $a_k(f)$ – індикатор доступності відповідної компоненти. Для визначення вагових коефіцієнтів використано експертне оцінювання. До зовнішньої калібрації цей індекс розглянуто як внутрішню міру траєкторної мікроеваріативності, при цьому:

$confidence_index(f) = 1 - chaos_score(f)$, а його вищі значення відповідають нижчій траєкторній мікроеваріативності.

Для забезпечення достовірності результатів введено робастну підмножину проходів із достатнім віконним покриттям:

$$\mathcal{F}_{\geq 3} = \{f \in \mathcal{F} : n_{windows}(f) \geq 3\}, \quad (22)$$

де $\mathcal{F}_{\geq 3}$ – робастна підмножина проходів; $n_{windows}(f)$ – кількість ковзних вікон у проході f .

Робастний контроль відокремлює значення інтегрального індексу від показника достатності віконного покриття та зменшує ризик інтерпретації коротких або слабко покритих проходів як стійких проявів траєкторної нестабільності.

На основі розроблених моделей сформовано фрактально-епізодний конвеєр обробки ІСНЗ-траєкторій: нормалізацію AIS/ECDIS-даних, розрахунок кінематичних ознак, оцінювання фрактальних показників Higuchi, DFA та Katz, побудову ковзних полів, квантильне виділення активних вікон, агрегацію мікроепізодів, нормування за довжиною шляху, фрактальне кодування, інтегральне оцінювання мікроеваріативності та робастний контроль якості.

У **четвертому розділі** «Концептуальні основи інтелектуального оцінювання психофізіологічних станів оператора в задачах забезпечення стійкості ергатичних навігаційних систем» розроблено діагностично-прогностичний апарат для ідентифікації станів оператора в процесах управління рухом судна. Розділ логічно

продовжує результати попереднього. Якщо фрактально-епізодний аналіз перетворює AIS/ECDIS-траєкторію на систему зовнішніх індикаторів керувальної активності, то четвертий розділ формалізує операторські стани, які можуть зумовлювати такі прояви.

Показано, що людський фактор у судноводінні доцільно розглядати не як зовнішнє джерело випадкових помилок, а як діагностований компонент ергатичного контуру. У цьому контурі увага, дисторсія суб'єктивного часу, ментально-мотиваційні стани (ММС), функціональне виснаження, антиципаційні стратегії та критичне сприйняття навігаційної ситуації утворюють взаємопов'язану систему операторських параметрів.

На першому етапі розроблено формально-геометричну модель розподілу уваги оператора. Множину функціонально значущих каналів інформаційного поля подано як: $V_{att} = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$, де v_i – i -й інформаційний або керувальний канал. Для кожного каналу вводиться вага уваги $w_i(t)$, а обмеженість ресурсу уваги задається умовою нормування: $\sum_{i=1}^n w_i(t) = 1$. Тоді вектор розподілу уваги має вигляд:

$$W_{att}(t) = (w_1(t), w_2(t), \dots, w_n(t)), w_i(t) \geq 0, \sum_{i=1}^n w_i(t) = 1. \quad (23)$$

Показано, що така модель дозволяє описати увагу як нормований розподіл обмеженого ресурсу між каналами ECDIS, RADAR/ARPA, AIS, VHF-комунікацією, візуальним спостереженням, органами керування та зовнішнім середовищем. Це створює основу для визначення моментів неповного охоплення навігаційної ситуації.

Наступним етапом формалізовано дисторсію суб'єктивного часу (рис. 12). У роботі вона розглядається не як безпосередньо вимірюваний психологічний стан, а як комплексний прояв, що може відображатися у часових, траєкторних, поведінкових і навігаційних ознаках. Для фрагмента траєкторії e введено множину нормованих ознак: $X_e = \{C_e^T, C_e^R, C_e^Y, C_e^S, C_e^A\}$, де C_e^T – нормоване часове відхилення; C_e^R – ознака зміни кутової швидкості або курсової динаміки; C_e^Y – ознака зміни курсу або ризикання; C_e^S – ознака зміни швидкісного або просторового профілю; C_e^A – ознака порушення типової послідовності дій або антиципаційної перебудови.

Інтегральний індикатор прояву ДЧС для фрагмента e подано як:

$$I_D(e) = \omega_T C_e^T + \omega_R C_e^R + \omega_Y C_e^Y + \omega_S C_e^S + \omega_A C_e^A, \omega_T + \omega_R + \omega_Y + \omega_S + \omega_A = 1, \omega_i \geq 0 \quad (24)$$

Рішення щодо прояву ДЧС приймається за пороговим правилом:

$$D(e) = \begin{cases} 0, & I_D(e) < \theta_1, \\ 1, & \theta_1 \leq I_D(e) < \theta_2, \\ 2, & I_D(e) \geq \theta_2, \end{cases} \quad 0 < \theta_1 < \theta_2 < 1 \quad (25)$$

де $D(e)$ відповідає відсутності ознак ДЧС, $D(e) = 1$ – помірному прояву, $D(e) = 2$ – вираженому прояву ознак ДЧС.

Для опису ДЧС як нечіткого стану введено нечітку змінну:

$$D = \{(x, \mu_D(x)) \mid x \in U_D\}, \mu_D : U_D \rightarrow [0;1], \quad (26)$$

де U_D – носій нечіткої змінної ДЧС, $\mu_D(x)$ – функція належності.

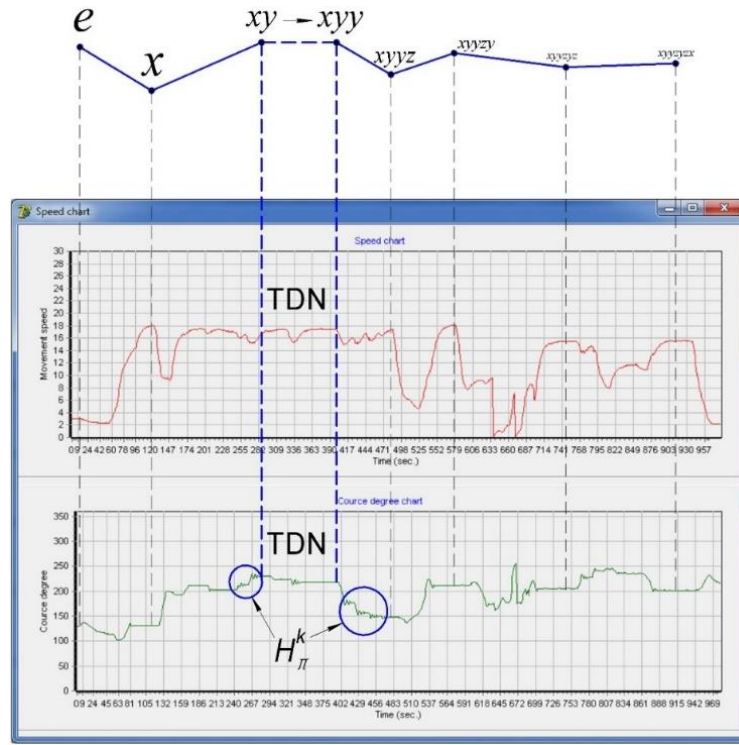


Рисунок 12. Модель ідентифікації інтервалів ДЧС (TDN) на фактичній траєкторії руху судна

Показано, що часові деформації можуть бути пов'язані з фізичними параметрами руху судна: зміною швидкості, курсу, локальними коливаннями та інтервалами TDN. Тому ДЧС доцільно ідентифікувати через поєднання часових, траєкторних і поведінкових ознак, а не за одним окремим показником.

Подальший розвиток отримала модель ідентифікації ментально-мотиваційних станів оператора (рис. 13). У роботі використано p -основне / b -основне ієрархічне кодування, яке дозволяє формально впорядкувати стани за структурною близькістю. Загальний код стану у системі на основі b подано як:

$$x = \sum_{j=0}^{N-1} \alpha_j b^j, \alpha_j \in \{0, 1, \dots, b-1\}. \quad (27)$$

Для прикладного випадку $b = 4$:

$$x = \alpha_0 + \alpha_1 \cdot 4 + \alpha_2 \cdot 4^2 + \dots + \alpha_{N-1} \cdot 4^{N-1}, \alpha_j \in \{0, 1, 2, 3\}. \quad (28)$$

Близькість двох кодів визначається через кількість збіжних молодших розрядів:

$$\rho_b(x, y) = \max\{r \geq 0 : x \equiv y \pmod{b^r}\}, d_b(x, y) = b^{-\rho_b(x, y)}. \quad (29)$$

Умова близькості станів має вигляд:

$$d_p(x, y) \leq b^{-r} \Leftrightarrow x \equiv y \pmod{b^r}. \quad (30)$$

Показано, що у такій моделі близькість ментально-мотиваційних станів визначається не звичайною різницею числових кодів, а збігом ієрархічно значущих розрядів. Це дозволяє формально відрізнати поверхневу числову близькість від структурної подібності операторських станів.

Для забезпечення відтворюваності класифікації кодом стану є ієрархічний запис:

$$\text{Code}(s) = \alpha_i, \delta_j, \varphi_k, \lambda_l, \gamma_m, \quad \alpha_i, \delta_j, \varphi_k, \lambda_l, \gamma_m \in \{0, 1, 2, 3\}, \quad (31)$$

де s – ідентифікований ментально-мотиваційний стан; α_i – базова гілка мотиваційного простору; δ_j – група функціональних або поведінкових ознак; φ_k – конкретизована ознака; λ_l – рівень її прояву; γ_m – уточнювальний розряд належності до відповідного класу стану.

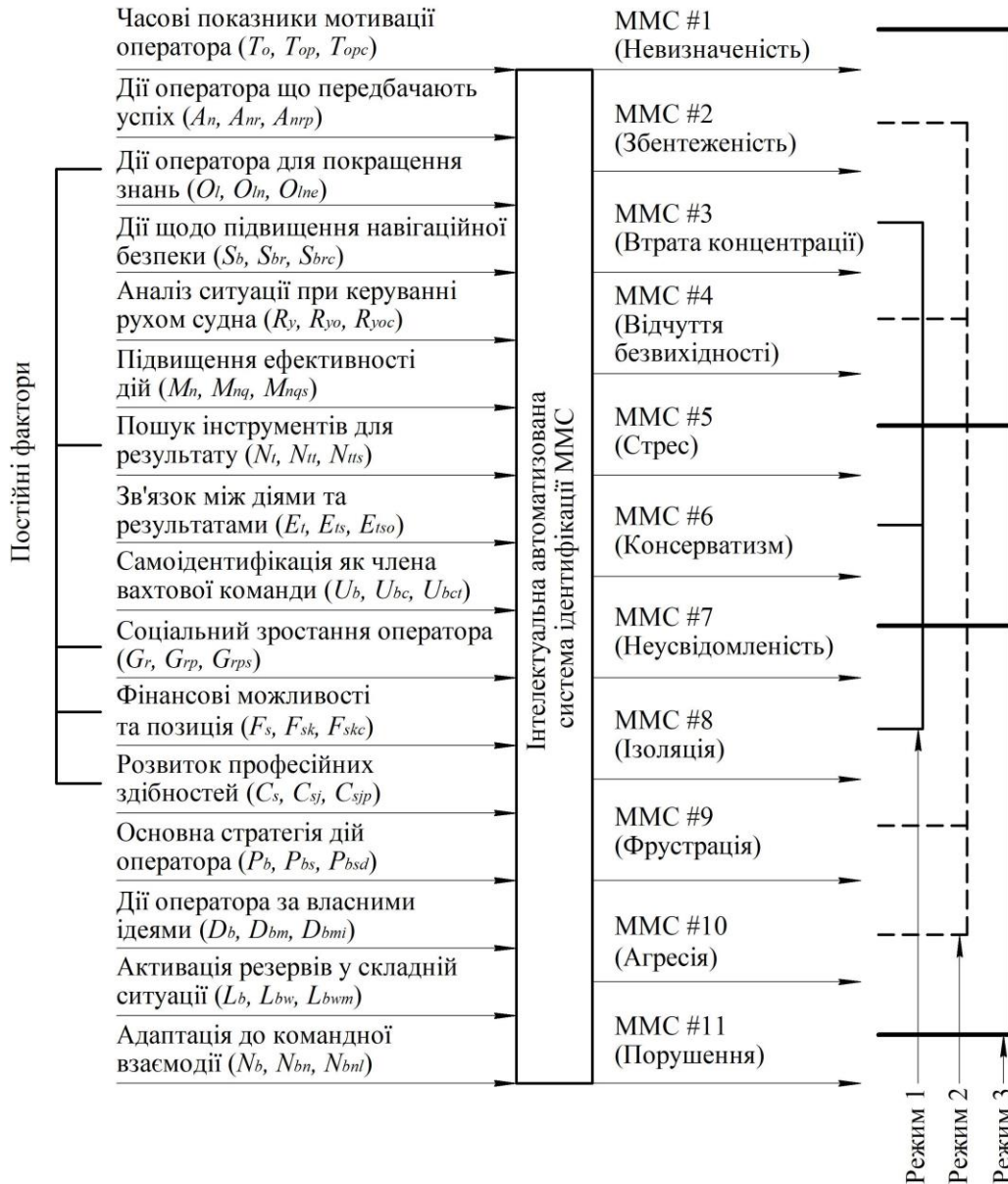


Рисунок 13. Режими ідентифікації ментально-мотиваційних станів оператора

Порівняльний аналіз підтвердив, що ментально-мотиваційний стан не може бути надійно ідентифікований за одним параметром. Він формується як результат узгодженого впливу часових показників, дій оператора, мотиваційних факторів, аналізу ситуації, пошуку інструментів для досягнення результату, нормативної поведінки та стратегії дій. Окремо розроблено підхід до непрямой ідентифікації функціонального виснаження оператора. У роботі розмежовано зовнішній експертно заданий стан втоми $F^*(t)$ та розрахунковий індикатор непрямих ознак.

Основним об'єктом моделювання є інтегральний індикатор:

$$I_F(t) = \omega_1 C_{post}(t) + \omega_2 C_{react}(t) + \omega_3 C_{mov}(t) + \omega_4 C_{phys}(t), \quad \sum_{i=1}^4 \omega_i = 1, \quad \omega_i \geq 0, \quad (32)$$

де $C_{post}(t)$ – постуральна ознака; $C_{react}(t)$ – ознака уповільнення реакції; $C_{mov}(t)$ – ознака зміни рухової активності; $C_{phys}(t)$ – фізіологічна ознака; ω_i – вагові коефіцієнти.

Модельна оцінка функціонального виснаження задається пороговим правилом:

$$\hat{F}(t) = \begin{cases} 0, & I_F(t) < \theta_F, \\ 1, & I_F(t) \geq \theta_F, \end{cases} \quad (33)$$

де θ_F – порогове значення індикатора. Доведено, що за відсутності зовнішньої норми $F^*(t)$ результат $\hat{F}(t)$ не слід трактувати як остаточну діагностику втоми. Він має статус непрямой індикаторної оцінки сукупності ознак, потенційно пов'язаних із функціональним виснаженням оператора.

Подальший розвиток отримала логіко-геометрична модель антиципації та поведінкових стратегій оператора (рис. 14). Для структурного подання повторюваних, зворотних або циклічних переходів між стратегіями використано графову модель.

Для кількісного уточнення результату введено коефіцієнт структурного покриття:

$$K_{cov} = \frac{N_{Cayley}}{N_{all}} \cdot 100\% = \frac{43}{54} \cdot 100\% = 79,6\% \quad (34)$$

де N_{all} – загальна кількість проаналізованих індивідуальних траєкторій або їхніх фрагментів; N_{Cayley} – кількість фрагментів, які можуть бути подані переходами графа Келі без втрати порядку дій, повторів, повернень або циклічних переходів.

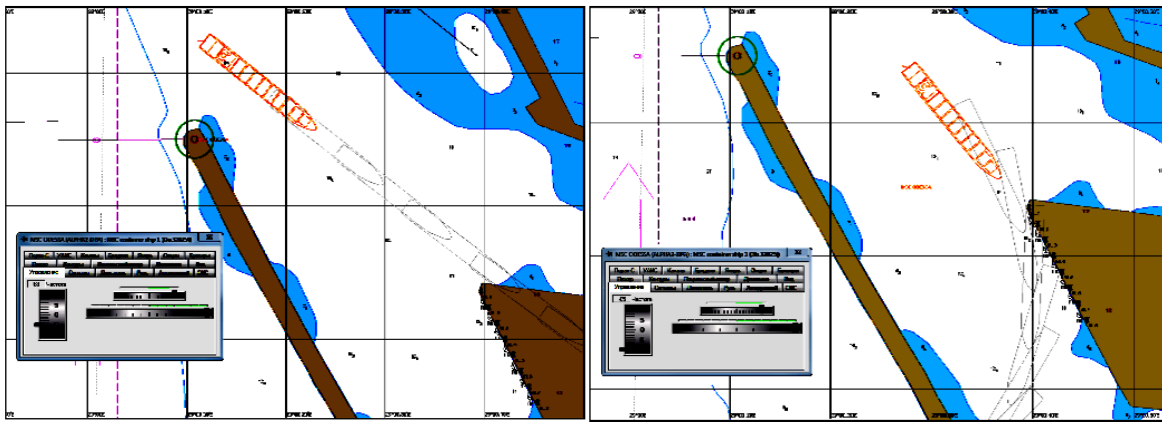


Рисунок 14. Приклад прогнозування дій оператора у складній навігаційній ситуації:
а) вихідна ситуація; б) прогнозований розвиток маневру

Отримані результати показали, що формалізація станів оператора має прикладне значення для прогнозування розвитку навігаційної ситуації. Урахування ММС, часових ознак, попередньої структури дій і поточного навігаційного контексту дозволяє не лише фіксувати операторський стан, а й оцінювати ймовірний напрям подальшого маневру.

На основі розроблених моделей сформовано інтегрований діагностично-прогностичний контур ІСНЗ (рис. 15). У цьому контурі операторські стани, часові деформації, ММС, досвід, емоційне напруження, командна синхронізація, структура попередніх дій і зовнішні впливи використовуються для оцінювання критичності ситуації та прогнозування результативності подальших дій.

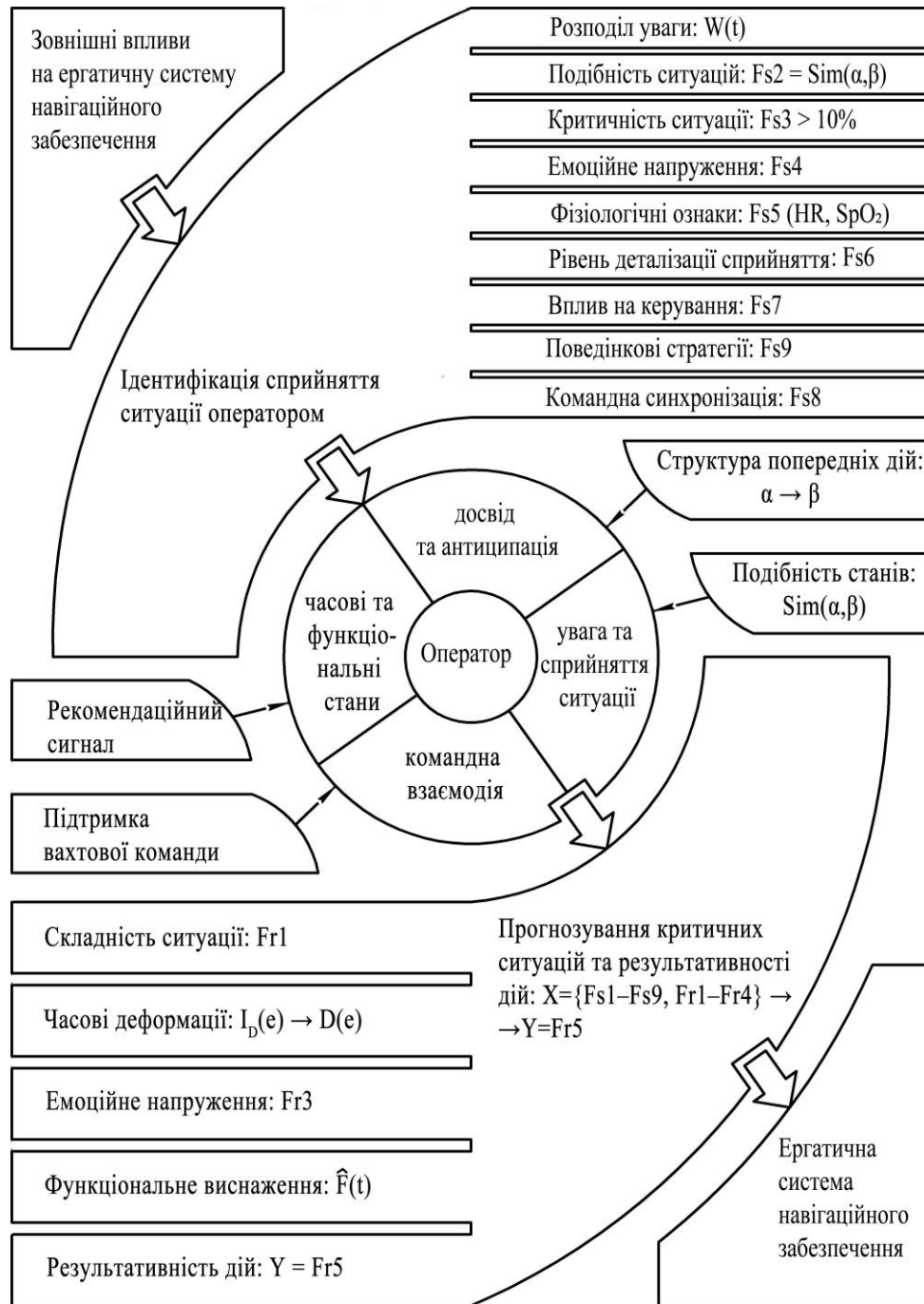


Рисунок 15. Інтегрована модель ідентифікації сприйняття ситуації оператором та прогнозування критичних наслідків в ергатичній системі управління судном

Для прогнозування критичних ситуацій у CART-моделі використано 13 ознак: Fs_1-Fs_9 і Fr_1-Fr_4 , а Fr_5 – як цільову змінну, де розбиття виконується за критерієм Джині, а порогові значення є модельно-емпіричними.

У п'ятому розділі «Методологія інтегрованого управління ризиками людського фактора в ергатичних комплексах навігаційного забезпечення» розроблено методологічну основу переходу від оцінювання спостережуваних проявів операторських станів і ризиків до ризик-орієнтованого керувального реагування. Результати попередніх розділів – інформаційне поле оператора, траєкторні індикатори керувальної активності та формалізовані операторські стани – інтегровані в єдиний контур оцінювання, прогнозування та зниження ризиків, пов'язаних із людським

фактором. Показано, що ризик людського фактора формується як результат взаємодії сприйняття навігаційної ситуації, часової організації дій, стійкості керування, просторових обмежень, суб'єктивної ентропії та здатності оператора до своєчасної корекції маневру. Тому ризик подано не як наслідок окремої помилки, а як керований параметр ергатичної системи навігаційного забезпечення.

На першому етапі навігаційну ситуацію формалізовано як нормований вектор ознак:

$$s_{nav}(t) = (CPA(t), TCPA(t), V(t), \psi(t), \dot{\psi}(t), XTE(t), d_{min}(t), \rho_{traf}(t), I_{COLREG}(t), \Delta t_{react}(t)), \quad (35)$$

де $CPA(t)$, $TCPA(t)$ – параметри небезпечного зближення; $V(t)$ – швидкість судна; $\psi(t)$, $\dot{\psi}(t)$ – курс і швидкість зміни курсу; $XTE(t)$ – поперечне відхилення; $d_{min}(t)$ – мінімальна відстань до небезпеки; $\rho_{traf}(t)$ – щільність трафіку; I_{COLREG} – індикатор обмежень МПЗЗС; $\Delta t_{react}(t)$ – інтервал реакції оператора.

Для опису зміни рівня деталізації сприйняття ситуації використано відображення між графами різного рівня дискретизації p -адичної складності:

$$\Pi_{p \rightarrow q} : G_p \rightarrow G_q, \quad q \in \{p-1, p, p+1\}, \quad (36)$$

де G_p і G_q – графи подання навігаційної ситуації на різних рівнях деталізації; перехід $q = p+1$ відповідає уточненню сприйняття, а $q = p-1$ – його узагальненню.

Наведено, що оператор може переходити між різними рівнями деталізації навігаційної ситуації (рис. 16).

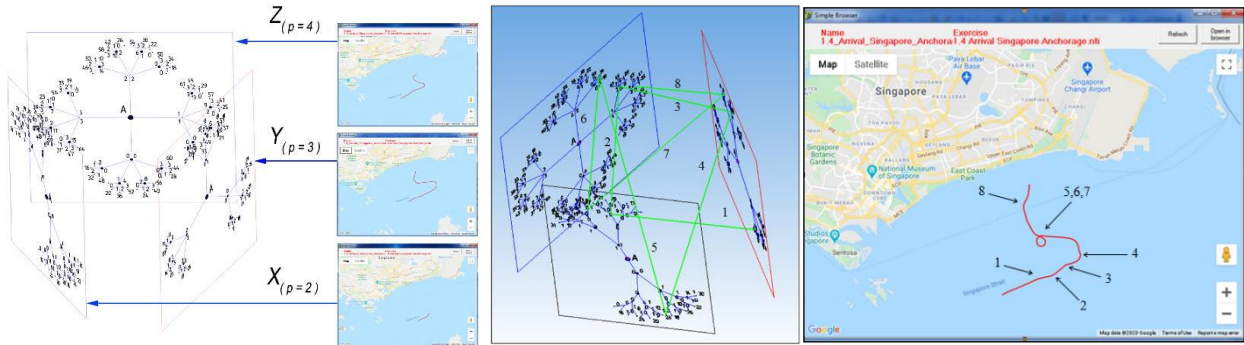


Рисунок 16. Просторова модель інтелектуальної діяльності оператора

Це дозволяє описати не лише поточний стан обстановки, а й індивідуальну структуру її розпізнавання, що безпосередньо впливає на вибір подальшої дії та якість керування рухом судна.

Наступним етапом було розроблено просторове зонування навігаційного ризику. Для кожної точки x акваторії локальна щільність аварійних і передаварійних подій

визначається як: $\rho(x_{geo}) = \sum_{i=1}^N K_h(d(x_{geo}, x_{geo,i}))$, де $x_{geo,i}$ – точка фіксації зіткнення, небезпечного зближення або порушення безпечного коридору; $d(x, x_i)$ – геодезична відстань; $K_h(\cdot)$ – ядрова функція згладжування.

На основі $\rho(x_{geo})$ акваторія поділяється на зони різного рівня ризику:

$$Z_{low} = \{x_{geo} : \rho(x_{geo}) < \tau_1\}, Z_{mid} = \{x_{geo} : \tau_1 \leq \rho(x_{geo}) < \tau_2\}, Z_{high} = \{x_{geo} : \rho(x_{geo}) \geq \tau_2\}, \quad (37)$$

де τ_1 , τ_2 – пороги переходу між зонами ризику.

Порівняльний аналіз підтвердив, що навігаційний ризик має сценарний характер. Зміна видимості, інтенсивності руху та локальних умов проходження змінює межі зон низького, середнього та високого ризику.

Для ранньої ідентифікації втрати керованості використано вектор ознак нестійкого керування:

$$\mathbf{q}(t) = \begin{pmatrix} |\dot{\psi}(t)|, |\ddot{\psi}(t)|, |\dot{V}(t)|, |\delta_r(t)|, |\dot{\delta}_r(t)|, |XTE(t)|, \\ g_c(CPA(t)), g_T(TCPA(t)), g_d(d_{\min}(t)), I_{COLREG}(t) \end{pmatrix}^T, \quad (38)$$

де $\delta_r(t)$ – кут перекладки руля; інші параметри характеризують курсову, просторову, часову та нормативну небезпеку ситуації.

Інтегральний показник ризику втрати керованості визначається як:

$$R_{LC}(t) = \sigma(\beta_0 + \beta^T \bar{\mathbf{q}}_w(t)), \quad (39)$$

де $\sigma(x) = 1/(1 + e^{-x})$ – логістична функція; $\bar{\mathbf{q}}_w(t)$ – згладжений вектор ознак у часовому вікні w ; β – параметри моделі.

Активация аварійного або рекомендаційного реагування виконується за таким правилом: $R_{LC}(t) \geq \tau_{LC}$, де τ_{LC} – поріг активації модуля автоматизованої ідентифікації критичних ситуацій (МАІКС) (рис. 17).

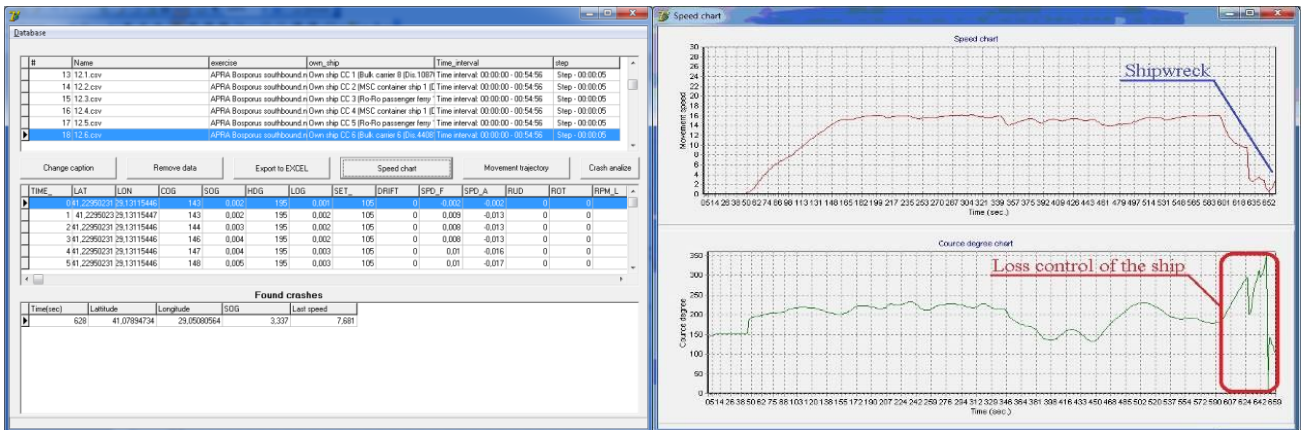


Рисунок 17. Динаміка параметрів керування судном, рульові команди та критична траєкторія у передкритичному режимі

Отримані результати показали, що втрата керованості має комплексний прояв: вона відображається у динаміці параметрів керування, нестійкій часовій структурі рульових команд і формуванні критичної траєкторії. Це дозволяє використовувати $R_{LC}(t)$ як індикатор раннього виявлення передкритичного режиму та підставу для активації рекомендаційного або аварійного реагування.

Для узгодження ризик-орієнтованого реагування з фізичною динамікою руху судна використано загальну модель: $\dot{x}(t) = f(x(t), u(t), w(t))$, де $x(t)$ – вектор стану судна; $u(t)$ – вектор керування; $w(t)$ – вектор зовнішніх збурень. Доведено, що така модель забезпечує зв'язок між оцінюванням ризику втрати керованості та фізичною динамікою судна.

Далі розроблено інформаційно-аналітичну модель суб'єктивної ентропії, дисторсії часу та антиципаційних станів оператора.

Показано, що відхилення від оптимальної траєкторії може бути зумовлене не лише зовнішніми збуреннями, а й внутрішніми операторськими чинниками: невизначеністю вибору, негативною антиципацією, часовою дисторсією та суб'єктивною ентропією.

Для практичного оцінювання суб'єктивно-ентропійного стану використано скалярний критерій:

$$F_{\omega}(\mathbf{m}, \mathbf{y}) = \sum_{k=1}^K \omega_k \tilde{F}_k(\mathbf{m}, \mathbf{y}), \quad \sum_{k=1}^K \omega_k = 1, \quad \omega_k \geq 0, \quad (40)$$

де $\mathbf{m}$ – вектор факторів першого рівня; $\mathbf{y}$ – вектор проявів суб'єктивної ентропії; $\tilde{F}_k$ – нормовані часткові критерії; ω_k – вагові коефіцієнти, визначені експертно або за результатами калібрування на тренажерних даних.

На другому рівні визначається коригувальний вплив:

$$\mathbf{z}^* = \arg \min_{\mathbf{z} \in Z(\mathbf{y}^*, \mathbf{j})} \Phi(\mathbf{m}, \mathbf{y}^*, \mathbf{j}, \mathbf{z}), \quad (41)$$

де $\mathbf{y}^* \in Y_0(\mathbf{m})$ – ідентифікований вектор проявів суб'єктивної ентропії; $\mathbf{j}$ – контекстний вектор; $\mathbf{z}$ – допустимий коригувальний вплив.

Показано, що така дворівнева модель забезпечує перехід від виявлення суб'єктивно-ентропійного стану до вибору коригувального впливу: попереджувального сигналу, зміни інформаційного відображення, рекомендації щодо посилення вахти або переходу до аварійного режиму підтримки.

Завершальним компонентом розділу стало методичне обґрунтування психодіагностичного оцінювання та тренінгового формування взаємодії «капітан–лоцман». Управління ризиками людського фактора не обмежується алгоритмічним реагуванням, а включає формування професійної взаємодії, мотиваційно-сміслових характеристик і копінг-стратегій операторів.

Для аналізу індивідуальних змін після формувального етапу використано різницевий показник: $\Delta X_i = X_{i,after} - X_{i,before}$, де $X_{i,before}$ і $X_{i,after}$ – значення відповідного показника до і після формувального етапу. Показано, що для малої вибірки інформативним є аналіз індивідуальних змін кожного учасника, а не лише порівняння середніх значень.

На основі розроблених моделей сформовано інтегрований контур управління ризиками людського фактора: дані про середовище та оператора $\rightarrow$ ознаки стану і поведінки $\rightarrow$ ідентифікація рівня ризику $\rightarrow$ правило керувального реагування $\rightarrow$ підтримка, коригувальне або тренінгове втручання.

Це створює методологічну основу для експериментальної верифікації моделей, методів і механізмів управління ІСНЗ у шостому розділі дисертації.

У шостому розділі «Експериментальна верифікація моделей і методів управління інформаційною системою навігаційного забезпечення» виконано підсумкову перевірку запропонованої методології, моделей і методів ІСНЗ на тренажерних, AIS/ECDIS- та LOG-даних. Експериментально підтверджено наскрізний контур верифікації, який узагальнено на рис. 18.

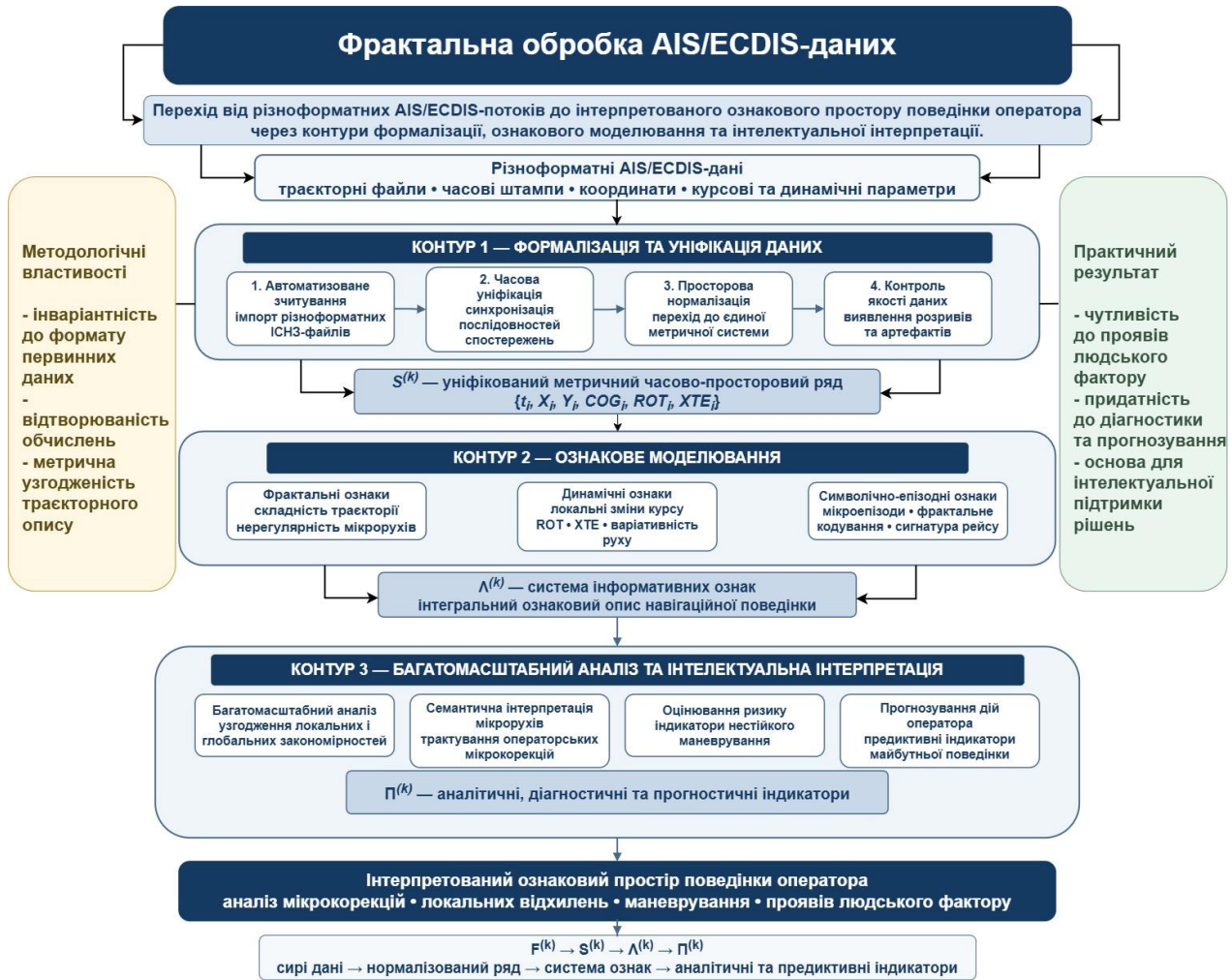


Рисунок 18. Узагальнений конвеєр фрактально-епізодного аналізу AIS/ECDIS-траєкторій

Контур охоплює: первинні навігаційні дані → траєкторні індикатори → експертне ECDIS-оцінювання → інтегральний ризик ICH3 → сценарна класифікація → LOG-валідація → експертне підтвердження критичного епізоду.

Перший рівень верифікації виконано на масиві 8686 AIS/ECDIS-проходів, із яких 8684 проходи включено до аналізу. Для індексу *chaos_score* отримано діапазон 0–0,537832034, середнє значення 0,246463881, медіану 0,253518041. Для *confidence_index* встановлено діапазон 0,462167966–1, середнє значення – 0,753536119, медіану – 0,746481959.

Підтверджено реалізацію повного контуру фрактальної обробки: від різноформатних AIS/ECDIS-даних до простору траєкторних ознак керувальної активності (рис. 18). У результаті сформовано діагностичні та прогнозовані індикатори мікрокорекцій, локальних відхилень, маневрування і проявів людського фактору.

Статистична перевірка підтвердила узгодженість *chaos_score* із рівнями навігаційного ризику (рис. 19). Для повної вибірки статистика Крассела–Волліса становила 2083,591262, коефіцієнт Спірмена між *chaos_score* і *severity_code* – 0,465872403. На робастній підмножині $\Phi \geq 3$ статистика Крассела–Волліса становила 1774,812601 при $p < 10^{-300}$, а коефіцієнт Спірмена зріс до 0,604712534 при $p < 10^{-300}$.

Це дало підставу розглядати `chaos_score` як статистично узгоджений із категоріями ризику проксі-індикатор траєкторної мікроеваріативності.

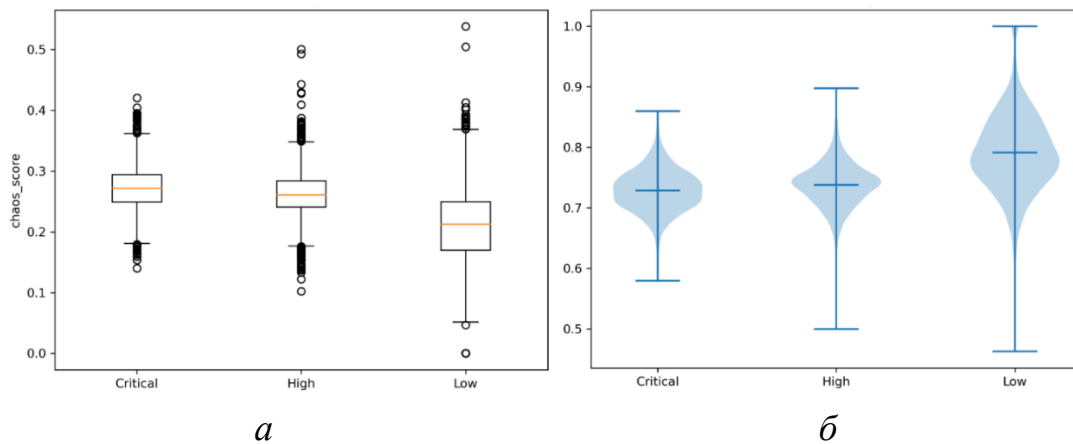


Рисунок 19. Розподіл індексів за рівнями навігаційного ризику: а) boxplot `chaos_score`; б) violin-діаграма інверсного індексу мікроеваріативності / `confidence_index`

Показано зміщення `chaos_score` до більших значень для груп High і Critical порівняно з Low. На робастній підмножині залишено 4228 проходів, із яких 4226 включено до аналізу; середнє значення `chaos_score` становило 0,257191182, медіана – 0,267300152.

Другий рівень верифікації реалізовано через експертно задане ECDIS-оцінювання траєкторій (рис. 20).



Рисунок 20. Структура автоматизованої експертної системи оцінювання ECDIS-відхилень траєкторії руху судна

Координатні, швидкісні, курсові та статистичні відхилення агрегуються в інтегральну оцінку відповідності фактичного проходу за шкалою 0–100. Це забезпечило перехід від аналізу внутрішньої мікроеваріативності траєкторії до оцінювання її навігаційної відповідності заданому профілю.

Експерименти підтверджують просторову локалізацію проблемних ділянок проходу порту Лагос. Це дозволяє пояснювати зниження оцінки через конкретні фрагменти траєкторії, а не через узагальнені числові відхилення.

Операторсько-часовий рівень було перевірено на даних роботи 76 операторів, зібраних протягом 8 місяців у середовищі NTPRO 5000 (рис. 21).



Рисунок 21. Аналіз операцій відносно $X_{(p=2)}$, $Y_{(p=3)}$, $Z_{(p=4)}$ і часу виконання

Аналіз охопив поворот на 90°, швартування та постановку на якір. Для непередбачуваних дій МАІКС виявив 4 випадки формування непрогнозованої гілки реакцій, яким передувала пауза, що перевищувала поріг у 3–5 разів. Це підтвердило діагностичну цінність часових затримок як ознаки порушення нормальної структури процесу ухвалення рішень.

Для короткострокового прогнозування часових рядів автоматизовано отримано 7 активних MLP-моделей. Найкращою визначено модель №5 MLP 28-7-1: Training perf. – 0,993928, Test perf. – 0,997598, Training error – 16,30374, Test error – 68,20398. З огляду на зростання похибки зі збільшенням горизонту прогнозування практичне використання моделі обмежено двома циклами з подальшим оновленням вхідних даних (рис. 22).

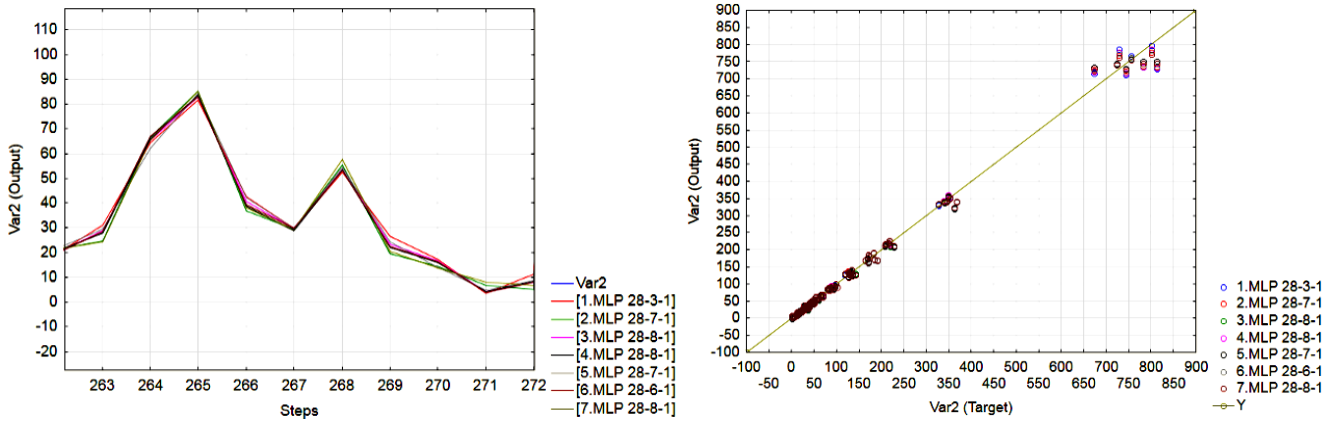


Рисунок 22. Фрагмент графіка прогнозу та розсіювання цільових і вихідних змінних

Багатоканальну ідентифікацію стану операторів виконано з використанням траєкторних, часових, поведінкових, фізіологічних, термографічних і контекстних ознак. Фізіологічні й термографічні ознаки використано як допоміжний інженерний шар. Їхнє доказове значення підтверджено синхронізацією з LOG-даними, ECDIS-журналами, фазою маневру, відеофіксацією та експертним контекстом.

Ключовим результатом розділу є сценарне моделювання інтегрального показника впливу людського фактора на ризик ІСНЗ. Перевірку виконано для шести сценаріїв: S_1 – відкрите море вдень; S_2 – прибережний підхід; S_3 – перетин TSS; S_4 – нічне лоцманське проведення; S_5 – обмежена видимість; S_6 – штормовий аварійний режим у вузькому каналі.

Інтегральний показник задано як:

$$I_{HF \rightarrow R}(t) = \sigma \left(\begin{aligned} &\theta_0 + \theta_E E(t) + \theta_C C(t) + \theta_S S(t) + \theta_U U(t) + \theta_{EC} E(t)C(t) + \\ &+ \theta_{CS} C(t)S(t) + \theta_{SU} S(t)U(t) + \theta_{EU} E(t)U(t) \end{aligned} \right), \quad (42)$$

де $E(t)$ – епізодна траєкторна складова; $C(t)$ – когнітивно-часова складова; $S(t)$ – динаміко-стабілізаційна складова; $U(t)$ – керувально-ризикова складова; θ – вагові коефіцієнти та коефіцієнти взаємодії; $\sigma(\cdot)$ – логістична функція.

Monte Carlo-перевірку подано як:

$$\mathcal{M}_{MC} : \Theta_s(t) \rightarrow [\mathbb{E}(I_{HF \rightarrow R}), Q_{0.05}, Q_{0.50}, Q_{0.95}, P_{stable}, P_{strained}, P_{critical}]. \quad (43)$$

Класифікація режимів ІСНЗ виконана за правилом:

$$Mode(t) = \begin{cases} stable, & I_{HF \rightarrow R}(t) < \tau_1, \\ strained, & \tau_1 \leq I_{HF \rightarrow R}(t) < \tau_2, \\ critical, & I_{HF \rightarrow R}(t) \geq \tau_2. \end{cases} \quad (44)$$

Середнє значення $I_{HF \rightarrow R}$ зростає з ускладненням сценарію: 0,40426 для S_1 , 0,523952 для S_2 , 0,652503 для S_3 , 0,783486 для S_4 , 0,886972 для S_5 , 0,949974 для S_6 . Квантильний інтервал також зміщується до критичної області: для S_1 $Q_{0.05} - Q_{0.95} = 0,340121 - 0,474752$, для S_6 – $0,902474 - 0,981304$ (рис. 23, 24).

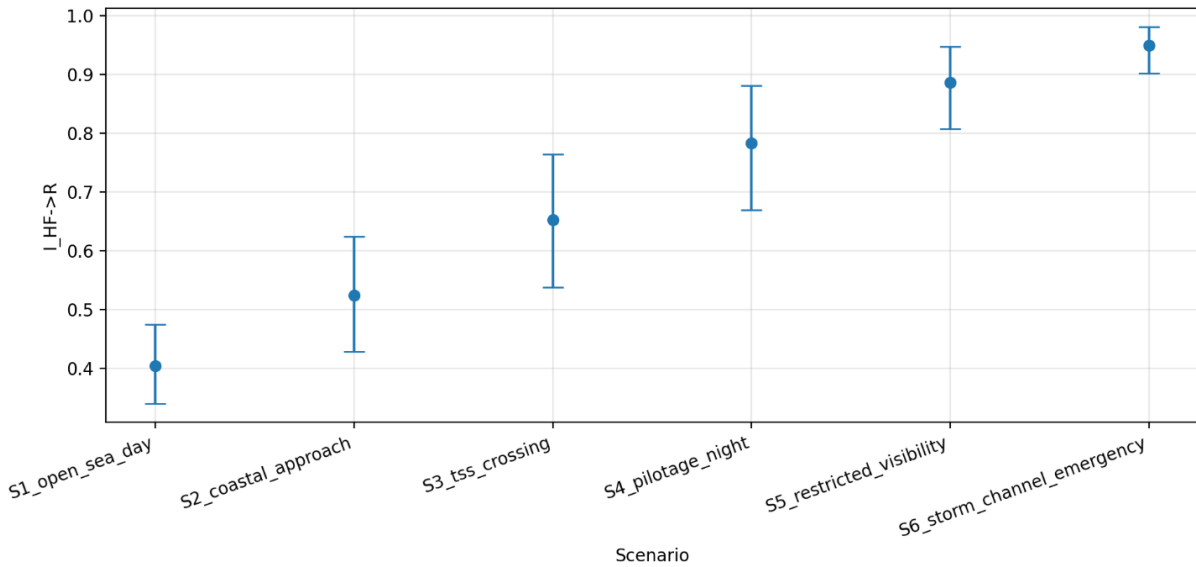


Рисунок 23. Середні значення інтегрального показника впливу людського фактора на зростання ризику ІСНЗ за сценаріями з квантильними межами $Q_{0.05} - Q_{0.95}$

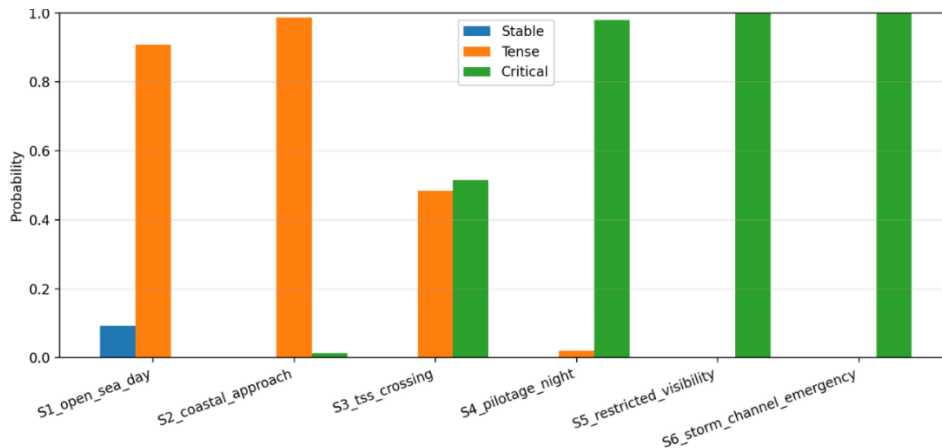


Рисунок 24. Імовірності перебування інформаційної системи навігаційного забезпечення у стабільному, напруженому та критичному режимах функціонування за результатами моделювання методом Монте-Карло

Як видно, для S_1 критичні реалізації відсутні: $P_{critical} = 0$; для S_2 $P_{critical} = 0,013067$; для S_3 – $0,515$; для S_4 – $0,9804$; для S_5 і S_6 – 1 . Це кількісно підтверджує перехід ІСНЗ від робочо-напруженого до критичного режиму. Часткові фактори також змінюються послідовно: E – від $0,163$ до $0,835$, C – від $0,132$ до $0,748$, S – від $0,134$ до $0,798$, U – від

0,112 до 0,744. Одночасно μ_{st} знижується від 0,811 до 0,253, L_{eff} – від 0,780 до 0,590, Ω зростає від 0,250 до 0,621, а $R_{dynamic}$ – від 0,150 до 0,770.

Зростання $I_{HF \rightarrow R}$ має динамічне підґрунтя: зменшується запас стійкості, скорочується ефективний резерв, зростає частота корекцій і підвищується ризик (рис. 25). Це підтверджує відповідність інтегрального показника фізичній логіці керованого руху судна.

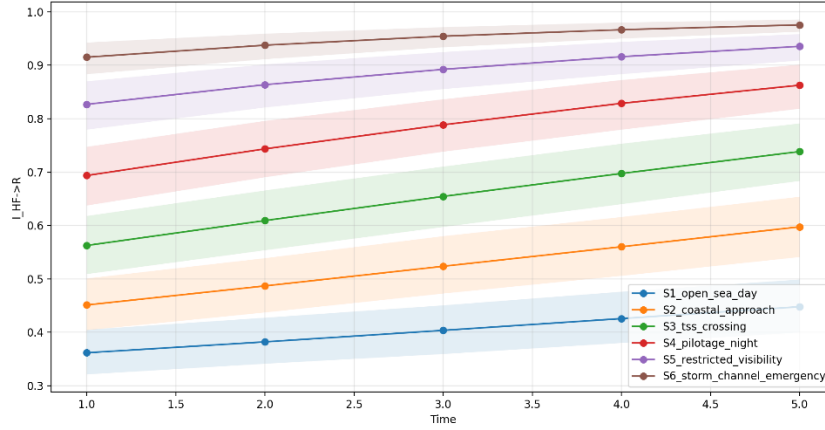


Рисунок 25. Часова еволюція інтегрального показника $I_{HF \rightarrow R}$ у шести сценаріях функціонування ІСНЗ

Фінальним рівнем стала експертна LOG-валідація (рис. 26). Із понад 300 тренажерних траєкторій відібрано 78 LOG-проходів з ознаками людського фактора: нестійкими керувальними діями, затримками реакції, відхиленнями від очікуваної траєкторії, підвищеною частотою корекцій, стресом, помилками ситуативної оцінки або порушеннями правил розходження.

Завершальний верифікаційний перехід подано як:

$$LOG^{(k)} \rightarrow S_{LOG}^{(k)} \rightarrow Z^{(k)} \rightarrow AI_{prediction}^{(k)} \rightarrow Expert_{validation}^{(k)} \rightarrow Verified_{mode}^{(k)}, \quad (45)$$

де $LOG^{(k)}$ – k -й LOG-файл; $S_{LOG}^{(k)}$ – структурований опис проходу; $Z^{(k)}$ – ознаковий простір; $AI_{prediction}^{(k)}$ – попередня AI-оцінка; $Expert_{validation}^{(k)}$ – експертна перевірка; $Verified_{mode}^{(k)}$ – верифікований режим ІСНЗ.

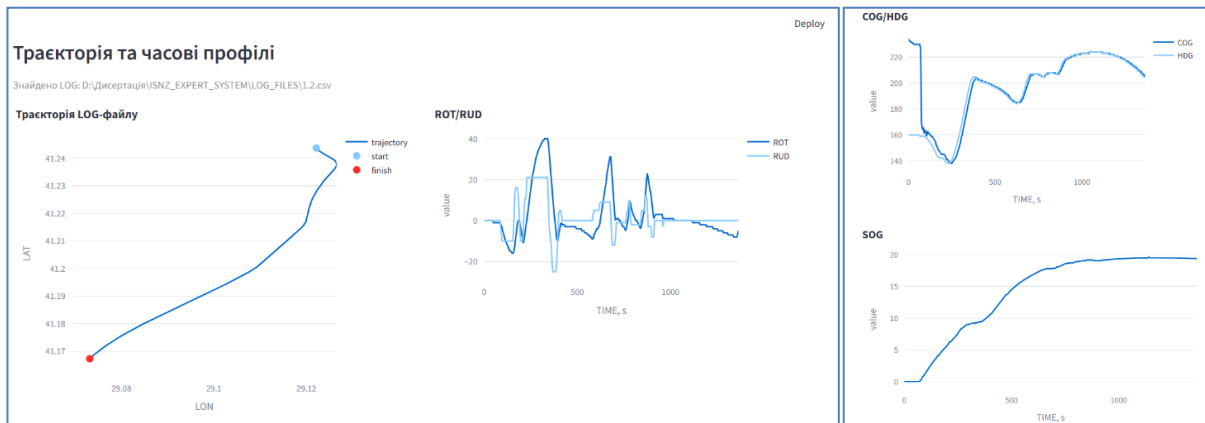


Рисунок 26. Відображення траєкторії LOG-файлу та часових профілів ROT/RUD, COG/HDG і SOG

Експертна система формує повний протокол перевірки: 226 епізодних записів, 9 гіпотез, 12 сценарних груп, 6 рівнів верифікації. Це забезпечує відтворюваність LOG-аналізу та контроль якості експертного підтвердження (рис. 27).

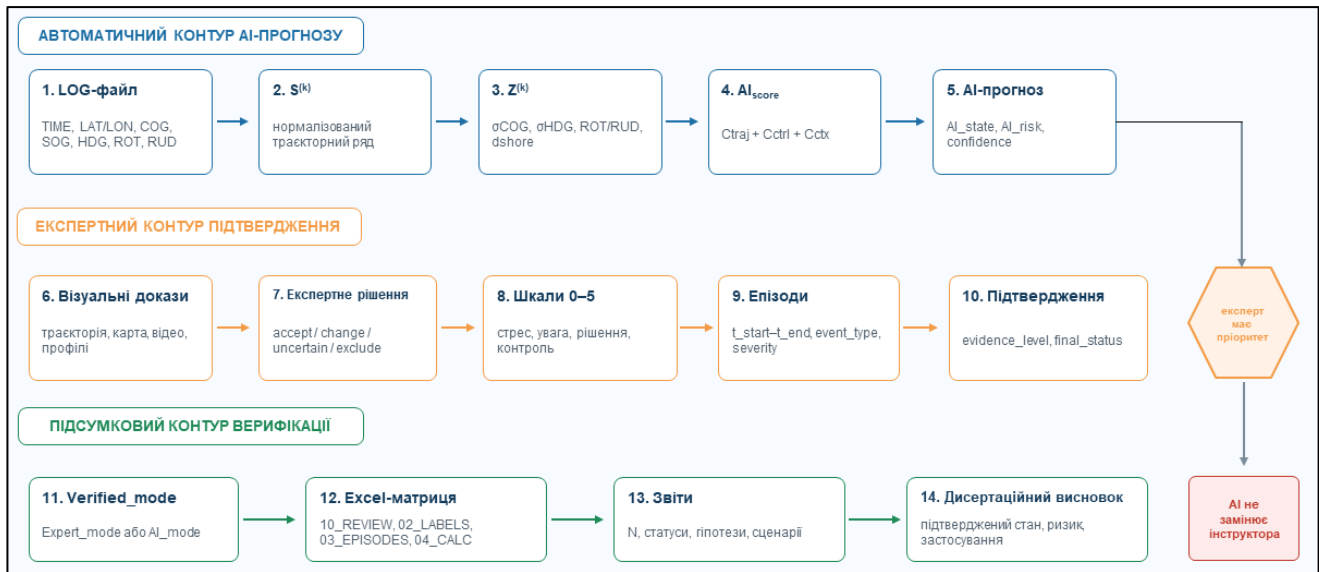


Рисунок 27. Алгоритм попереднього AI-прогнозування та експертного підтвердження LOG-проходу

Для проходу на прикладі LOG-файлу – 1.2.csv, первинний AI-модуль визначив stable / moderate: chaos_score = 0,3439, мінімальну відстань до берегової межі – 183,2 м, просторовий статус – relatively_safe. Експертний аналіз карти, відеоматеріалів і додаткових факторів встановив критичний контекст: помилку розходження із зустрічним судном, порушення схеми руху, стрес оператора та некваліфіковані керувальні дії.

Отримані результати підтвердили працездатність ICH3 на всіх рівнях: фрактально-епізодний аналіз перевірено на 8684 AIS/ECDIS-проходах; статистичну узгодженість chaos_score із ризиком підтверджено критеріями Краскела-Волліса, Манна-Вітні та Спірмена; ECDIS-оцінювання реалізовано у шкалі 0–100; сценарна модель показала зростання $I_{HF \rightarrow R}$ від 0,40426 до 0,949974; критичний режим досягав імовірності близько до 1 у сценаріях S_5 і S_6 ; LOG-валідацію виконано на 78 проходах.

Таким чином, у шостому розділі експериментально доведено, що людський фактор оператора у системах навігаційного забезпечення є кількісно оцінюваним, діагностованим і експертно верифікованим компонентом ергатичної системи.

ВИСНОВКИ

Результатом виконання наукового дослідження є розв’язання актуальної науково-технічної проблеми підвищення безпеки мореплавства шляхом розроблення науково-методологічних основ управління ергатичними системами навігаційного забезпечення. У дисертації людський фактор подано як вимірюваний, діагностований, прогнозований і керований компонент інформаційно-керуючого контуру руху судна. За підсумками дослідження зроблено такі основні висновки.

1. Виконано комплексний аналіз сучасного стану навігаційних інформаційних систем, автоматизованих засобів керування рухом суден, систем підтримки прийняття

рішень, AIS/ECDIS, RADAR/ARPA, VTS та підходів до врахування людського фактора. Встановлено, що наявні підходи переважно розглядають технічну, інформаційну, ризикову та операторську складові окремо, без їх інтеграції в єдиний ергатичний контур. Це обґрунтувало необхідність розроблення ІСНЗ як цілісної людино-машинної системи.

2. Сформульовано наукову гіпотезу дослідження, згідно з якою підвищення безпеки, адаптивності та достовірності ергатичних систем навігаційного забезпечення досягається шляхом формалізованого включення параметрів людського фактора до моделей обробки AIS/ECDIS-даних, оцінювання ризику, прогнозування операторських дій і підтримки прийняття рішень.

3. Вперше розроблено концептуально-методологічне забезпечення управління ергатичними системами навігаційного забезпечення, у якому оператор, інформаційне поле, технічні засоби, зовнішнє середовище, нормативні обмеження, засоби підтримки рішень і режими керування подані як взаємопов'язані елементи ІСНЗ, що дозволило розглядати людський фактор не як зовнішнє джерело помилки, а як внутрішній параметр функціонування системи.

4. Розроблено модель інформаційного поля оператора, у якій інтегровано дані ECDIS, AIS, RADAR/ARPA, GNSS, VTS, метеорологічну інформацію, вимоги COLREG, Bridge SOP, а також портові й процедури компаній. Отримана модель формалізує інформаційне поле як функціональний центр ІСНЗ, у межах якого здійснюється сприйняття навігаційної ситуації, оцінювання ризику, вибір режиму керування та формування рекомендаційної або коригувальної дії.

5. Розроблено методологічні засади формалізації AIS/ECDIS-даних і перетворення різнорідних навігаційних записів на стандартизований часово-просторовий ряд, що дозволило використовувати траєкторію судна не лише як геометричний слід руху, а й як цифрове відображення керувальної активності оператора, придатне для подальшої діагностики, прогнозування та експертної оцінки.

6. Розроблено фрактально-епізодний метод обробки ІСНЗ-траєкторій, який поєднує нормалізацію AIS/ECDIS-даних, розрахунок кінематичних ознак, фрактальне оцінювання, ковзне віконне подання, виділення активних епізодів і робастний контроль якості. Експериментальна перевірка на масиві 8684 AIS/ECDIS-проходів підтвердила статистичну узгодженість індексу *chaos_score* з рівнями навігаційного ризику та довела придатність методу для виявлення траєкторної мікроеваріативності.

7. Удосконалено методи ідентифікації когнітивних, часових, психофізіологічних і поведінкових станів оператора. Розроблено формально-геометричну модель розподілу уваги, модель дисторсії суб'єктивного часу, *p*-адичне кодування ментально-мотиваційних станів, модель непрямой ідентифікації функціонального виснаження та графову інтерпретацію антиципаційних стратегій, що дозволило формалізувати стан оператора як змінний параметр ергатичного контуру.

8. Розроблено методологію інтегрованого управління ризиками людського фактора в ергатичних комплексах навігаційного забезпечення. У межах цієї методології навігаційну ситуацію подано як нормований вектор ознак, просторовий ризик – як зоновану щільність небезпечних подій, втрату керованості – як інтегральний показник передкритичного режиму, а коригувальний вплив – як результат оптимізаційного вибору в умовах суб'єктивної ентропії та часової дисторсії.

9. Розроблено інформаційно-технологічний підхід до експериментальної

діагностики кваліфікаційно-поведінкових характеристик оператора, який поєднує аналіз ECDIS-відхилень, AIS/ECDIS-траєкторій, LOG-проходів, часових та операторських індикаторів, експертних шкал і правил валідації, що забезпечило перехід від автоматичного виявлення відхилень до їхньої професійної навігаційної інтерпретації.

10. Виконано сценарно-імітаційну перевірку інтегрального показника впливу людського фактора на ризик ІСНЗ ($I_{HF \rightarrow R}$). Для шести сценаріїв – від відкритого моря до штормового аварійного режиму – середнє значення показника зросло від 0,40426 до 0,949974, а ймовірність критичного режиму досягла 1 у сценаріях обмеженої видимості та штормового аварійного проходу, що підтвердило здатність моделі кількісно відображати перехід ІСНЗ від стабільного до критичного функціонування.

11. Доведено внутрішню узгодженість інтегральної моделі ризику. Зростання ($I_{HF \rightarrow R}$) супроводжується збільшенням епізодної, когнітивно-часової, динаміко-стабілізаційної та керувально-ризикової складових, зменшенням запасу стійкості (μ_{st}), скороченням ефективного резерву (L_{eff}), зростанням частоти вимушених корекцій (Ω) та динамічного ризику ($R_{dynamic}$), що підтвердило відповідність інтегрального показника фізичній логіці керування рухом судна.

12. Здійснено завершальну LOG-валідацію розроблених моделей і методів. Із понад 300 тренажерних траєкторій відібрано 78 LOG-проходів з ознаками людського фактора, для яких сформовано експертний протокол перевірки. На прикладі LOG-проходу доведено необхідність поєднання автоматизованого AI-прогнозування з експертною перевіркою, оскільки первинна оцінка *stable/moderate* була скоригована до *critical* на підставі карти, відеоматеріалів, шкал стану оператора, епізодної розмітки та підтвердження інструктора.

13. Основні практичні результати дослідження впроваджені у навчальний процес морських закладів вищої освіти, тренажерну підготовку морських фахівців, процедури аналізу AIS/ECDIS-даних, LOG-валідації, діагностики операторських станів і оцінювання ризиків людського фактора. Отримані результати створюють науково-методологічну основу для побудови інтелектуальних ергатичних систем навігаційного забезпечення, систем підтримки прийняття рішень оператором, засобів експертного контролю траєкторій та адаптивного управління ризиками в процесах навігації й управління рухом судна.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

LIST OF PUBLISHED WORKS ON THE THESIS TOPIC

В опублікованих у співавторстві наукових працях особисто авторів належать такі результати:

Перелік статей у журналах, що індексуються наукометричними базами даних Scopus, Web of Science Core Collection

List of articles in journals indexed in Scopus, Web of Science Core Collection

1. **Nosov, P. S., Ben, A. P., Mateychuk, V. N., Safonov, M. S.** Identification of “Human Error” Negative Manifestation in Maritime Transport // *Radio Electronics, Computer Science, Control*. 2018. No. 4 (47). P. 204–213. DOI: 10.15588/1607-3274-2018-4-20. *Web of Science*. – *Формалізовано ознаки суб’єктивної ентропії та невизначеності поведінки оператора як інформаційні параметри аналізу негативних проявів людського фактора в ергатичній системі навігаційного забезпечення.*

2. **Nosov, P.**, Ben, A., Safonova, A., Palamarchuk, I. Approaches Going to Determination Periods of the Human Factor of Navigators during Supernumerary Situations // Radio Electronics, Computer Science, Control. 2019. No. 2 (49). P. 140–150. DOI: 10.15588/1607-3274-2019-2-15. *Web of Science*. – *Обґрунтовано використання часових інтервалів прояву людського фактора як параметрів аналізу стану оператора в умовах позаплатної навігаційної ситуації.*

3. Zinchenko, S. M., **Nosov, P. S.**, Mateychuk, V. M., Mamenko, P. P., Grosheva, O. O. Automatic Collision Avoidance with Multiple Targets, Including Maneuvering Ones // Radio Electronics, Computer Science, Control. 2019. No. 4. P. 211–222. DOI: 10.15588/1607-3274-2019-4-20. *Web of Science*. – *Визначено місце задачі багатоцільового розходження в структурі інтелектуального контуру управління рухом судна та обґрунтовано її значення для зниження навігаційного ризику.*

4. Zinchenko, S. M., Ben, A. P., **Nosov, P. S.**, Popovych, I. S., Mamenko, P. P., Mateichuk, V. M. Improving the Accuracy and Reliability of Automatic Vessel Motion Control System // Radio Electronics, Computer Science, Control. 2020. No. 2. P. 183–195. DOI: 10.15588/1607-3274-2020-2-19. *Web of Science*. – *Обґрунтовано застосування спостерігача стану та контролю вимірювальної інформації для підвищення надійності автоматичного управління рухом судна при відмовах датчиків і виконавчих органів.*

5. Plokhikh, V., Popovych, I., Koval, I., Stepanenko, L., **Nosov, P.**, Zinchenko, S., Boiaryn, L., Zavatskyi, V. Anticipatory Resource of Temporary Regulation of Sensorimotor Action // BRAIN. Broad Research in Artificial Intelligence and Neuroscience. 2022. Vol. 13, No. 2. P. 1–21. DOI: 10.18662/brain/13.2/328. *Web of Science*. – *Визначено можливість використання антиципаційного ресурсу як теоретичної основи для пояснення часової підготовки оператора.*

6. **Nosov, P. S.**, Zinchenko, S. M., Popovych, I. S., Ben, A. P., Nahrybelnyi, Y. A., Mateichuk, V. M. Diagnostic System of Perception of Navigation Danger when Implementation Complicated Maneuvers // Radio Electronics, Computer Science, Control. 2020. No. 1. P. 146–161. DOI: 10.15588/1607-3274-2020-1-15. *Web of Science*. – *Сформовано формально-логічний опис сприйняття навігаційної небезпеки оператором та визначено параметри ознак, які пов'язують складний маневр із рівнем аналізу ситуації.*

7. **Nosov, P.**, Palamarchuk, I., Zinchenko, S., Popovych, I., Nahrybelnyi, Y., Nosova, H. Development of Means for Experimental Identification of Navigator Attention in Ergatic Systems of Maritime Transport // Bulletin of University of Karaganda. Technical Physics. 2020. No. 1 (97). P. 58–69. DOI: 10.31489/2020Ph1/58-69. *Web of Science*. – *Розроблено основу для формалізованого подання розподілу уваги оператора в ергатичній системі та визначено її зв'язок із аналізом навігаційної ситуації на ходовому містку.*

8. **Nosov, P. S.**, Popovych, I. S., Cherniavskyi, V. V., Zinchenko, S. M., Prokopchuk, Y. A., Makarchuk, D. V. Automated Identification of an Operator Anticipation on Marine Transport // Radio Electronics, Computer Science, Control. 2020. No. 3. P. 158–172. DOI: 10.15588/1607-3274-2020-3-15. *Web of Science*. – *Формалізовано антиципаційні прояви оператора як прогностичні ознаки, що впливають на своєчасність оцінювання навігаційної ситуації та вибір дій у контурі управління рухом судна.*

9. **Nosov, P.**, Cherniavskiy, V., Zinchenko, S., Popovych, I., Prokopchuk, Y., Safonov, M. Identification of Distortion of the Navigator's Time in Model Experiment // Bulletin of University of Karaganda. Instrument and Experimental Techniques. 2020. No. 4 (100). P. 57–70. DOI: 10.31489/2020Ph4/57-70. *Web of Science*. – *Розроблено формальне подання дисторсії суб'єктивного часу оператора як часової ознаки зміни операторського стану в ергатичних системах управління рухом судна.*

10. **Nosov, P.**, Popovych, I., Zinchenko, S., Cherniavskiy, V., Plokhikh, V., Nosova, H. The Research on Anticipation of Vessel Captains by the Space of Kelly's Graph // Revista Inclusiones. 2020. Vol. 7, Special Issue. P. 90–103. *Web of Science*. – *Обґрунтовано подання антиципації оператора у вигляді графа для опису очікуваних рішень у складній навігаційній ситуації.*

11. Shevchenko, R., Cherniavskiy, V., Zinchenko, S., Palchynska, M., Bondarevich, S., **Nosov, P.**, Popovych, I. Research of Psychophysiological Features of Response to Stress Situations by Future Sailors // Revista Inclusiones. 2020. Vol. 7, Special Issue. P. 566–579. *Web of Science*. – *Визначено психофізіологічні характеристики стресового реагування майбутніх моряків як підґрунтя для подальшого врахування стійкості операторського стану в ергатичних системах судноводіння.*

12. Zinchenko, S., Mateichuk, V., **Nosov, P.**, Popovych, I., Solovey, O., Mamenko, P., Grosheva, O. Use of Simulator Equipment for the Development and Testing of Vessel Control Systems // Electrical, Control and Communication Engineering. 2020. Vol. 16, No. 2. P. 58–64. DOI: 10.2478/ecce-2020-0009. *Web of Science*. – *Обґрунтовано використання тренажерно-імітаційного середовища як експериментальної бази для перевірки підходів автоматизованого управління рухом судна.*

13. **Nosov, P. S.**, Cherniavskiy, V. V., Zinchenko, S. M., Popovych, I. S., Nahrybelnyi, Y. A., Nosova, H. V. Identification of Marine Emergency Response of Electronic Navigation Operator // Radio Electronics, Computer Science, Control. 2021. No. 1. P. 208–223. DOI: 10.15588/1607-3274-2021-1-20. *Web of Science*. – *Розроблено подання реакцій оператора електронної навігації для оцінювання ймовірності негативного впливу людського фактора в ергатичному контурі управління судном.*

14. **Nosov, P.**, Zinchenko, S., Ben, A., Prokopchuk, Y., Mamenko, P., Popovych, I., Moiseienko, V., Kruglyj, D. Navigation Safety Control System Development through Navigator Action Prediction by Data Mining Means // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2021. Vol. 2, No. 9 (110). P. 55–68. DOI: 10.15587/1729-4061.2021.229237. *Scopus*. – *Формалізовано дані, що характеризують дії оператора, та обґрунтовано їх використання для прогнозу ризику в ергатичному контурі управління рухом судна.*

15. **Nosov, P.**, Popovych, I., Zinchenko, S., Kobets, V., Safonova, A., Appazov, E. Automatic Determination of the Navigators Motivation Model when Operating Water Transport // Radio Electronics, Computer Science, Control. 2021. No. 3. P. 152–165. DOI: 10.15588/1607-3274-2021-3-13. *Web of Science*. – *Формалізовано мотиваційні ознаки оператора як елементи моделі прийняття рішень у складних навігаційних ситуаціях та визначено їх зв'язок із параметрами взаємодії оператора з електронними системами управління рухом судна.*

16. **Nosov, P.**, Zinchenko, S., Plokhikh, V., Popovych, I., Prokopchuk, Y., Makarchuk, D., Mamenko, P., Moiseienko, V., Ben, A. Development and Experimental Study of Analyzer to Enhance Maritime Safety // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2021.

Vol. 4/3 (112). P. 27–35. DOI: 10.15587/1729-4061.2021.239093. Scopus. – *Визначено діагностичні ознаки, що дозволяють зіставляти реакції оператора з параметрами маневрувань і безпеки судна та використовувати їх для експериментальної перевірки моделей проявів людського фактора.*

17. Zinchenko, S., Tovstokoryi, O., Mateichuk, V., **Nosov, P.**, Popovych, I., Gritsuk, I. Automatic Vessel Steering in a Storm // Electrical, Control and Communication Engineering. 2022. Vol. 18, No. 1. P. 66–74. DOI: 10.2478/ecce-2022-0009. Scopus. – *Обґрунтовано автоматизоване визначення безпечної швидкості та курсу судна за параметрами руху і хвилювання для керування судном у штормових умовах.*

18. **Nosov, P.**, Koretsky, O., Zinchenko, S., Prokopchuk, Y., Gritsuk, I., Sokol, I., Kyrychenko, K. Devising an Approach to Safety Management of Vessel Control through the Identification of Navigator's State // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2023. Vol. 4, No. 3 (124). P. 19–32. DOI: 10.15587/1729-4061.2023.286156. Scopus. – *Розроблено ознакове подання стану оператора для задач управління безпекою руху судна та обґрунтовано включення цього стану до ергатичного контуру оцінювання навігаційного ризику.*

19. Ponomaryova, V., **Nosov, P.**, Ben, A., Popovych, I., Prokopchuk, Y., Mamenko, P., Dudchenko, S., Appazov, E., Sokol, I. Devising an Approach for the Automated Restoration of Shipmaster's Navigational Qualification Parameters under Risk Conditions // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2024. Vol. 1, No. 3 (127). P. 6–26. DOI: 10.15587/1729-4061.2024.296955. Scopus. – *Обґрунтовано використання кваліфікаційних параметрів оператора як змінних ризик-орієнтованого аналізу та визначено їх зв'язок із відновленням безпечного режиму керування в ергатичній системі навігаційного забезпечення.*

20. Ponomaryova, V., **Nosov, P.** Development of a Method for Predicting Hazardous Ship Trajectories under Uncertainty of Navigator Actions // Technology Audit and Production Reserves. 2024. Vol. 5, No. 2 (79). P. 44–55. DOI: 10.15587/2706-5448.2024.313523. Scopus. – *Розроблено підхід до прогнозування небезпечних траєкторій руху судна за умов невизначеності дій оператора та обґрунтовано його використання для попереднього оцінювання навігаційного ризику.*

21. **Nosov, P.**, Melnyk, O., Kalina, T., Jurkovič, M., Onishchenko, O., Malaksiano, M., Sokol, A., Nykytyuk, P. Fractal–Episodic Assessment of Ship Control Microvariability for Human-Factor-Aware Navigation Risk Monitoring in Maritime Autonomous Systems // Future Transportation. 2026. Vol. 6, No. 3. Art. 117. DOI: 10.3390/futuretransp6030117. Scopus. – *Розроблено фрактально-епізодний підхід до оцінювання мікроеваріативності керування судном як траєкторного індикатора ризику з урахуванням людського фактора для моніторингу навігаційної небезпеки.*

22. **Nosov, P.**, Melnyk, O., Malaksiano, M., Shumylo, O., Onishchenko, O., Yarovenko, V., Zinchenko, S., Popovych, I. A Unified Fractal Processing Framework for Normalized AIS and ECDIS Ship Trajectories // Digital. 2026. Vol. 6, No. 1. Art. 11. DOI: 10.3390/digital6010011. Scopus. – *Сформовано концептуальні засади та виконано дослідження роботи уніфікованого фрактального конвеєра обробки AIS/ECDIS-траєкторій.*

23. **Nosov, P.**, Melnyk, O., Malaksiano, M., Mamenko, P., Onyshko, D., Fomin, O., Píštěk, 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), 150. DOI: 10.3390/make7040150. Scopus. – *Розроблено методологічні засади та забезпечено ресурсно-організаційний супровід машинного семантичного аналізу наукових публікацій у галузі морської безпеки.*

Перелік статей у виданнях, що входять до переліку наукових фахових видань України.

List of articles in Ukrainian professional scientific editions

Усі праці цього розділу належать до фахових видань категорії Б

24. **Носов, П. С.,** Волошинов, С. А., Бень, А. П., Новиков, А. В. Моделювання інтелектуальної діяльності особи, що приймає рішення, в умовах позаплатних ситуацій при управлінні судном // Науковий вісник Херсонської державної морської академії. 2017. № 2 (17). С. 238–243. – *Формалізовано позаплатну навігаційну ситуацію як об'єкт операторського аналізу та визначено роль інформаційної невизначеності у зміні структури прийняття рішення під час управління судном.*

25. **Носов, П. С.,** Крапивко, Г. І., Безкровний, В. О., Дудченко, О. М. Навігаційні інформаційні системи як засіб ідентифікації людського фактора судноводія // Науковий вісник Херсонської державної морської академії. 2018. № 2 (19). С. 260–269. – *Обґрунтовано використання даних навігаційних інформаційних систем як джерела ознак для непрямого аналізу впливу людського фактора на параметри руху судна.*

26. **Носов, П. С.,** Бень, А. П., Носова, Г. В., Карпова, С. О. Моделі і принципи розвитку інформаційних інтерфейсів на морському транспорті // Науковий вісник Херсонської державної морської академії. 2018. № 1 (18). С. 76–82. – *Визначено місце інформаційного інтерфейсу як елемента інформаційного поля оператора та обґрунтовано його значення для зниження когнітивного навантаження в ергатичній системі управління рухом судна.*

27. **Nosov, P. S.,** Palamarchuk, I. V., Safonov, M. S., Novikov, V. I. Modeling the Manifestations of the Human Factor of the Maritime Crew // Science and Transport Progress. 2018. No. 5 (77). P. 82–92. DOI: 10.15802/stp2018/147937. – *Обґрунтовано подання проявів людського фактора морського екіпажу як сукупності спостережуваних поведінкових і навігаційно-операторських ознак, придатних для подальшого формалізованого аналізу в ергатичному контурі судноводіння.*

28. **Nosov, P. S.,** Zinchenko, S. M., Ben, A. P., Nahrybelnyi, Ya. A., Dudchenko, O. M. Models of Decision Making by a Navigator under Implicit Agreements with COLREG Rules // Науковий вісник Херсонської державної морської академії. 2019. № 1 (20). С. 31–39. DOI: 10.33815/2313-4763.2019.1.20.031-039. – *Формалізовано умови неявної узгодженості дій оператора за МПЗЗС-72 та визначено їх значення для оцінювання конфліктності навігаційної ситуації в контурі управління рухом судна.*

29. **Nosov, P. S.,** Ben, A. P., Nosova, H. V., Novikov, V. I. Model of Attention Distribution of the Navigator while Keeping a Navigational Watch // Науковий вісник Херсонської державної морської академії. 2019. № 2 (21). С. 26–34. DOI: 10.33815/2313-4763.2019.2.21.026-034. – *Побудовано формально-геометричне подання розподілу уваги оператора між функціональними об'єктами навігаційної вахти та обґрунтовано його використання для аналізу повноти охоплення навігаційної ситуації.*

30. **Nosov, P. S.**, Zinchenko, S. M., Prokopchuk, Yu. A., Popovych, I. S., Litovchenko, V. I. Influence Human Factor on Safety's Planning Route of Water Transport // Scientific Bulletin Kherson State Maritime Academy. 2021. No. 1 (24). P. 57–70. DOI: 10.33815/2313-4763.2021.1.24.057-070. – *Обґрунтовано вплив людського фактора на безпечність планування маршруту водного транспорту та визначено його значення для оцінювання ризиків на етапі підготовки навігаційного переходу.*

31. Gritsuk, I. V., **Nosov, P. S.**, Ponomaryova, V. P., Diahyleva, O. S. Reduction of Navigation Risks by Using Fuzzy Logic to Automate Control Processes under Uncertainty // Наука і техніка сьогодні. 2023. № 6 (20). С. 8–22. – *Обґрунтовано застосування нечіткого підходу до формалізації невизначеності в процесах автоматизованого керування та зниження навігаційних ризиків.*

32. Gritsuk, I., **Nosov, P.**, Dyagileva, O., Masonkova, M. Improving Safety of Navigation by Constructing a Dynamic Model of the Navigator's Actions in the Conditions of Navigation Risks // Transport Systems and Technologies. 2023. No. 41. P. 84–95. DOI: 10.32703/2617-9059-2023-41-7. – *Розроблено динамічне подання дій оператора в умовах навігаційного ризику та визначено його використання для підвищення безпеки навігації в ергатичному контурі управління.*

33. **Nosov, P. S.** Systemic Approaches to Rational Management of Functional Marine Technical Systems and Complexes // Водний транспорт. 2023. № 2 (38). С. 80–95. DOI: 10.33298/2226-8553.2023.2.38.09. – *Сформульовано системний підхід до раціонального управління функціональними морськими технічними системами і комплексами з урахуванням автоматизації, ризиків, ергатичних аспектів і впливу людського фактора.*

34. Ponomaryova, V., **Nosov, P.** Method of Automated Identification of Qualification Parameters for Marine Operators under Risk Conditions // Науковий вісник Херсонської державної морської академії. 2023. № 1–2 (26–27). С. 144–165. DOI: 10.33815/2313-4763.2023.1-2.26-27.144-165. – *Обґрунтовано використання кваліфікаційних параметрів оператора як формалізованих ознак готовності до виконання керувальних дій за умов навігаційного ризику.*

35. Koretsky, O., **Nosov, P.**, Zinchenko, S., Pohorletskyi, D. Method of Automated Identification of Hazardous Fatigue Factors in Navigators Based on Sleep Indicators // Науковий вісник Херсонської державної морської академії. 2024. № 1 (28). С. 6–21. DOI: 10.33815/2313-4763.2024.1.28.006-021. – *Визначено індикатори втоми оператора за показниками сну та обґрунтовано їх використання для непрямого оцінювання операторського стану в ергатичному контурі управління рухом судна.*

36. Kochubei, P., **Nosov, P.** Determining the Impact of the Human Operator Factor Using a Navigation Simulator // Науковий вісник Херсонської державної морської академії. 2025. № 1 (30). С. 158–170. DOI: 10.33815/2313-4763.2025.1.30.158-170. – *Обґрунтовано використання навігаційного тренажера для кількісного оцінювання впливу оператора на параметри керування судном та визначення ролі людського фактора у формуванні траєкторії руху.*

37. Никитюк, П. В., **Носов, П. С.** Інтегративна модель статистичної класифікації навігаційних рейсів на основі фрактальних підписів та кодових патернів мікрорухів // Наука і техніка сьогодні. 2026. № 2 (56). С. 2064–2082. DOI: 10.52058/2786-6025-2026-2(56)-2064-2082. – *Розроблено подання статистичної класифікації навігаційних рейсів*

за фрактальними підписами як основу для виявлення траєкторної мікроеваріативності керування судном.

38. **Nosov, P.** Project-oriented Approach to Maritime Transport Safety Management Based on a Gravitational-Inertial Model // Scientific Bulletin of Kherson State Maritime Academy. 2025. No. 2 (31). P. 124–142. DOI: 10.33815/2313-4763.2025.2.31.124-142. – *Розроблено підхід до управління безпекою морського транспорту на основі гравітаційно-інерціальної моделі оцінювання стійкості та ризику.*

39. **Nosov, P. S.** Generalized Model of Control of Ergatic Navigational Support Systems with an Integral Indicator of the Influence of the Human Factor // Науковий вісник Херсонської державної морської академії. 2026. № 1 (32). С. 34–57. DOI: 10.33815/2313-4763.2026.1.32.034-057. – *Розроблено узагальнену модель управління ергатичними системами навігаційного забезпечення з інтегральним показником впливу людського фактора.*

Перелік статей у збірниках наукових праць та матеріалах конференцій Усі праці цього розділу індексуються у Scopus

40. **Nosov, P.,** Zinchenko, S., Popovych, I., Safonov, M., Palamarchuk, I., Blakh, V. Decision Support during the Vessel Control at the Time of Negative Manifestation of Human Factor // CEUR Workshop Proceedings. 2020. Vol. 2608. P. 12–26. Scopus. – *Формалізовано ознаки втрати ефективності керування під впливом людського фактора для підтримки рішень у процесі управління рухом судна.*

41. **Nosov, P.,** Ben, A., Zinchenko, S., Popovych, I., Mateichuk, V., Nosova, H. Formal Approaches to Identify Cadet Fatigue Factors by Means of Marine Navigation Simulators // CEUR Workshop Proceedings. 2020. Vol. 2732. P. 823–838. Scopus. – *Визначено формальні ознаки втоми курсантів за результатами тренажерних спостережень та обґрунтовано їх використання як непрямих індикаторів зміни операторського стану під час виконання навігаційних завдань безпечного функціонування в районах підвищеного навігаційного ризику.*

42. Mamenko, P., Zinchenko, S., Kobets, V., **Nosov, P.,** Popovych, I. Solution of the Problem of Optimizing Route with Using the Risk Criterion // In: Babichev, S., Lytvynenko, V. (eds.) *Lecture Notes in Computational Intelligence and Decision Making. ISDMCI 2021. Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies.* Vol. 77. Springer, Cham, 2022. P. 252–265. DOI: 10.1007/978-3-030-82014-5_17. Scopus. – *Обґрунтовано використання критерію ризику в задачах оптимізації маршруту руху судна як засобу поєднання навігаційної ефективності та безпеки проходження.*

Праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації та додатково відображають основні наукові результати дисертації

Works that confirm the approbation of the dissertation materials and additionally reflect the main scientific results of the dissertation

43. **Nosov, P. S.,** Ben, A. P., Kochubei, P. O. Development of a Formal Model for the Intelligent Analysis of Ship's Operator Fatigue // MPP&O-2025. P. 334–338. – *Окреслено формальні ознаки втоми оператора судна в задачах інтелектуального аналізу навігаційної діяльності.*

44. **Носов, П. С.** Аналіз підходів до розробки ергатичних систем у транспортній галузі // MINTT-2025. С. 72–74. – *Систематизовано підходи до побудови ергатичних систем у транспортній галузі.*

45. **Nosov, P.**, Nosov, A. Development of a Formal Model of an Adaptive Ergatic Ship Motion Control System // MINTT-2025. Р. 75–78. – *Запропоновано формальне подання адаптивної ергатичної системи управління рухом судна.*

46. **Носов, П. С.**, Дягилева, О. С., Пономарьова, В. П. Навігаційні тренажери як інструмент виявлення кваліфікаційних параметрів судноводіїв в ситуаційному керуванні безпекою судноплавства // MINTT-2025. С. 79–83. – *Обґрунтовано використання тренажерів для виявлення кваліфікаційних параметрів оператора.*

47. Кочубей, П. О., **Носов, П. С.** Підходи інтелектуального аналізу фактору судноводія в ергатичних системах управління рухом судна // MINTT-2025. С. 58–64. – *Окреслено підходи до інтелектуального аналізу фактора оператора в ергатичних системах.*

48. Ponomaryova, V. P., **Nosov, P. S.**, Mamenko, P. P., Medekong, R. A. Development of Smart Glasses for Supporting Mariner Decision-Making with ECDIS Data // MINTT-2024. Р. 16–18. – *Обґрунтовано використання ECDIS-даних у засобах підтримки рішень оператора.*

49. **Носов, П.**, Пономарьова, В., Бень, А., Маменко, П. Розробка системи автоматизованого функціонального аналізу траєкторії руху суден // N&SH-2024. С. 30–34. – *Окреслено принципи функціонального аналізу траєкторій руху суден.*

50. **Nosov, P.**, Ponomaryova, V., Prokopchuk, Y., Barylnik-Kurakov, I. Intelligent Analysis of Navigators' Maneuver Execution Based on Their Qualification Attributes // PSDMI-2024. Р. 142–146. – *Окреслено зв'язок кваліфікаційних атрибутів оператора з якістю виконання маневру.*

51. Koretsky, O., **Nosov, P.** Approaches to Developing a Decision Support System for Maneuvering Considering Navigator Fatigue // PSDMI-2024. Р. 128–132. – *Обґрунтовано врахування втоми оператора при маневруванні.*

52. **Nosov, P. S.**, Cherniavskyi, V. V., Onyshko, D. M., Koretsky, O. A. Intellectual Analysis of Transitional Motivational States in the Event of Critical Situations in Maritime Transport by ECDIS Data // Сучасні енергетичні установки на транспорті і технології та обладнання для їх обслуговування. 2023. С. 373–377. – *Окреслено використання ECDIS-даних для аналізу перехідних мотиваційних станів оператора.*

53. **Nosov, P. S.**, Koretsky, O. A., Onyshko, D. M., Makarchuk, D. V. Development of an Intelligent Decision Support System for Ship Movement Management Considering Ship Operator Fatigue // Стан, досягнення та перспективи інформаційних систем і технологій. 2023. С. 186–187. – *Обґрунтовано врахування втоми оператора в інтелектуальній підтримці управління рухом судна.*

54. Chernyavskyi, V. V., **Nosov, P. S.**, Sokol, I. V., Koretsky, O. A. Modeling of the Risks Due to the Stress Based on a Formal Analysis of the Navigator's Work with ECDIS // MINTT-2023. С. 61–68. – *Формалізовано зв'язок стресу оператора з ризиками роботи в ECDIS.*

55. **Nosov, P.**, Ponomaryova, V., Ben, A., Onyshko, D. Intelligent Approaches to Crew Readiness Assessment for Port Operations in Ergatic Ship Systems // 1st International Scientific and Practical Conference "Transport, Port, Logistics, Security: Modern-Day

Challenges and Development Prospects”. Р. 73–84. – *Окреслено інтелектуальні підходи до оцінювання готовності екіпажу до портових операцій.*

56. **Pavlo Nosov.** Outranking analysis of navigational hazards in shipmaster decision-support systems using Digraph3 // II Міжнародна науково-практична конференція «Навігація та керування судном: нові підходи, навчання та моделювання» (N&SH-2025). ОНМУ. С. 81–86. – *Запропоновано використання інформаційних систем Digraph3 для підтримки рішень оператора у критичних ситуаціях.*

57. Бень, А. П., Пономарьова, В. П., **Носов, П. С.**, Матейчук, В. М. Підхід до автоматизованого керування мотиваційною структурою навігатора за даними ECDIS // XIII Міжнародна науково-практична конференція «Сучасні підходи до високоефективного використання засобів транспорту». 2022. С. 64–67. – *Окреслено використання ECDIS-даних для аналізу мотиваційної структури оператора.*

58. Бень, А. П., **Носов, П. С.**, Зінченко, С. М., Попович, І. С. Інтелектуальний аналіз дій судноводіїв в ергатичних системах управління судном // MPP&O-2021. С. 473–477. – *Окреслено ознаки для інтелектуального аналізу дій оператора.*

59. **Pavlo Nosov.** Development of an intelligent AIS-data analyzer for project management in maritime safety of port areas // V Міжнародна науково-практична конференція. *Проектний та логістичний менеджмент: нові знання на базі двох методологій.* ОНМУ. С. 186–192. – *Розроблено алгоритм обробки даних AIS для визначення інтенсивності трафіку у протоках.*

60. **Nosov, P. S.,** Zinchenko, S. M., Mamenko, P. P., Mateichuk, V. M., Moiseienko, V. S. Complex Analysis of ECDIS-Data to Increase the Safety of Marine Transport Operation // Life Safety in Transport and Production: Education, Science, Practice. 2021. Р. 89–94. – *Обґрунтовано використання комплексного аналізу ECDIS-даних для підвищення безпеки морського транспорту.*

61. **Nosov, P. S.,** Zinchenko, S. M., Mamenko, P. P., Mateichuk, V. M., Moiseienko, V. S. Modeling the Behavior of Navigator to Improve Safety of Maritime Transport Operation // Life Safety in Transport and Production: Education, Science, Practice. 2021. Р. 95–100. – *Окреслено моделювання поведінки оператора для підвищення безпеки судноплавства.*

62. **Nosov, P. S.,** Zinchenko, S. M., Prokopchuk, Yu. O. Development of an Informational Model of Influence the “Human Factor” to Ergatic Maritime System // Праці II Міжнародного симпозіуму «Інтелектуальні рішення – С: Теорія прийняття рішень». 2021. С. 95–96. – *Розроблено інформаційне подання впливу людського фактора на ергатичну морську систему.*

63. **Носов, П. С.,** Зінченко, С. М., Нагрибельний, Я. А., Попович, І. С. Формальні підходи щодо ідентифікації зорової уваги судноводіїв під час несення навігаційної вахти // MINTT-2020. С. 37–40. – *Формалізовано ознаки зорової уваги оператора під час несення навігаційної вахти.*

64. **Nosov P.,** Nosov A. Development of an explainable MCDA-based decision support program for selecting a tactical approach to the port of Dover // MINTT-2026. С. 54–56. – *Формалізовано підходи підтримки дій оператора в умовах навігаційного ризику.*

65. Патент на корисну модель UA № 132741, МПК A61B 5/00 Аналізатор психоемоційного стану судноводія / **П. С. Носов,** С. М. Зінченко, В. М. Матейчук, В. Г. Ляшенко, А. П. Бень; заявл. 20.09.2018, опубл. 11.03.2019, Бюл. № 5/2019. – *Запропоновано технічне рішення для реєстрації психоемоційного стану оператора.*

АНОТАЦІЯ

Носов П.С. Науково-методологічні основи управління ергатичними системами навігаційного забезпечення. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.22.13 – навігація та управління рухом. – Національний університет «Одеська морська академія», м. Одеса, 2026.

У дисертаційній роботі науково обґрунтовано і доведено вирішення актуальної науково-технічної проблеми підвищення безпеки мореплавства, шляхом розроблення науково-методологічних основ управління ергатичними системами навігаційного забезпечення з урахуванням людського фактора як внутрішнього функціонального параметра інформаційно-керуючої системи руху судна.

За підсумками аналізу предметної галузі сформульовано актуальну науково-технічну проблему, що полягає у необхідності підвищення безпеки, стійкості та ефективності управління рухом суден в умовах інтенсифікації судноплавства, зростання інформаційного навантаження на оператора, ускладнення навігаційної обстановки та поширення автоматизованих засобів навігаційного забезпечення.

Виявлено системне протиріччя між потребою підвищення достовірності, оперативності та адаптивності процесів навігаційного забезпечення, з одного боку, та недостатньою формалізацією когнітивних, часово-поведінкових і психофізіологічних характеристик оператора в наявних моделях управління рухом судна, з іншого. У більшості сучасних підходів людський фактор розглядається переважно як зовнішнє джерело помилок або експлуатаційне обмеження, тоді як у реальних умовах управління рухом судна він є внутрішнім параметром ергатичної системи, що впливає на сприйняття навігаційної ситуації, своєчасність реакцій, вибір керувальних дій і рівень ризику.

На основі аналізу аварійності морських суден, розвитку концепції e-Navigation, сучасних AIS/ECDIS, RADAR/ARPA, VTS, GNSS, систем підтримки прийняття рішень та автоматизованих засобів керування встановлено, що подальше підвищення безпеки мореплавства потребує переходу від техноцентричного вдосконалення окремих засобів навігації до управління інформаційною системою навігаційного забезпечення як цілісною ергатичною схемою «оператор – інформація – ризик – рішення – режим керування».

Доведено, що ефективність функціонування ергатичних систем навігаційного забезпечення визначається не лише якістю технічних засобів або алгоритмів автоматизації, а й узгодженістю інформаційного поля оператора, його функціонального стану, параметрів навігаційного середовища, нормативних обмежень, ризиків людського фактора та режимів керування рухом судна.

Запропоновано комплексний підхід до управління ергатичними системами навігаційного забезпечення, який базується на поєднанні методів інтелектуальної обробки AIS/ECDIS-даних, фрактально-епізодного аналізу траєкторій, формалізації когнітивних і часово-поведінкових станів оператора, оцінювання ризиків людського фактора, експертної LOG-валідації та адаптивної підтримки прийняття рішень у процесах управління рухом судна.

Розроблено концептуально-структурну модель інформаційного поля оператора в ергатичних системах навігаційного забезпечення. Модель поєднує зовнішнє навігаційне середовище, технічні інформаційні потоки ECDIS, AIS, RADAR/ARPA,

GNSS, VTS, метеорологічні дані, вимоги COLREG, Bridge SOP, процедури портів і компаній, стани оператора, режими керування та результати безпеки. Це дозволяє подати процес управління рухом судна як взаємодію інформації, рішень, ризиків і керувального режиму в єдиній функціональній структурі.

Розроблено аналого-індикаторну модель стійкості та керованої динаміки ергатичної системи навігаційного забезпечення на основі гравітаційно-інерціальної інтерпретації. Запропонована модель дозволяє формалізувати запас стійкості, функціональний резерв, вплив зовнішніх і внутрішніх збурень, умови переходу до напруженого або критичного режиму та роль людського фактора у зміні меж керованості ICH3.

Розроблено формалізований фрактально-епізодний метод інтелектуальної обробки AIS/ECDIS-траєкторій, призначений для виявлення мікрорухів судна, локальних відхилень, мікрокорекцій курсу та траєкторних індикаторів керувальної активності оператора. Метод поєднує метричну нормалізацію навігаційних даних, розрахунок кінематичних ознак, фрактальне оцінювання у ковзних вікнах, виділення епізодів мікроеваріативності, їх фрактальне кодування, оцінювання епізодного ризику та робастний контроль якості. Це забезпечує формування відтворюваних профілів маневрування і кількісне оцінювання траєкторної мікроеваріативності як індикатора впливу людського фактора на безпечність руху судна.

Одержали подальший розвиток концептуальні засади побудови інтелектуальної технології обробки навігаційної інформації, відповідно до яких AIS/ECDIS-дані перетворюються на формалізований простір ознак поведінки оператора, придатний для аналізу мікрокорекцій курсу, локальних відхилень від лінії шляху, змінності параметрів маневрування, а також для ризик-орієнтованої статистичної інтерпретації та прогнозування операторських дій.

Розроблено формально-геометричну модель розподілу уваги оператора, яка дозволяє описувати обмежений ресурс уваги як метризований простір його розподілу між функціонально значущими об'єктами інформаційного поля. Модель забезпечує формалізацію механізмів перерозподілу уваги, визначення умов неповного охоплення навігаційної ситуації та виявлення передумов помилкових дій в ергатичній схемі керування.

Розроблено моделі ідентифікації дисторсії суб'єктивного часу, когнітивних, часово-поведінкових і психофізіологічних станів оператора. Запропоновані моделі дозволяють кількісно інтерпретувати операторські стани через часові, поведінкові, навігаційні, психодіагностичні та контекстні індикатори, пов'язувати їх із характеристиками навігаційної ситуації та використовувати для діагностики, прогнозування і підтримки прийняття рішень.

Розвинуто моделі та методи управління ризиками людського фактора в ергатичних системах навігаційного забезпечення. У межах запропонованого підходу ризик розглядається як керований об'єкт, для якого визначаються ознаки небезпечного стану оператора, його рівень, правило реагування та форма коригувального, підтримувального або тренінгового впливу. На цій основі обґрунтовано інтегровану схему: дані про середовище та оператора – ознаки стану і поведінки – ідентифікація рівня ризику – правило керувального реагування – коригувальне або рекомендаційне втручання.

З метою підвищення ефективності автоматизованого керування рухом судна розроблено та експериментально перевірено моделі, механізми і засоби, що охоплюють локальний рівень оптимального керування виконавчими органами, багатоцільове маневрування, штормове керування, маршрутизацію за ризиковим критерієм і програмно-апаратні засоби діагностики просторово-часової структури уваги оператора. Це підтвердило можливість практичного врахування людського фактора в задачах підтримки прийняття рішень, автоматизованого керування та аналізу безпечності руху судна.

Здійснено експериментальну верифікацію запропонованих моделей і методів на AIS/ECDIS-даних, тренажерних сценаріях, LOG-файлах, операторських та траєкторних індикаторах. Фрактально-епізодний аналіз перевірено на масиві 8684 AIS/ECDIS-проходів; операторсько-часову ідентифікацію – на даних 76 операторів-судноводіїв; інтегральний показник $I_{HF \rightarrow R}$ – у шести сценаріях функціонування ІСНЗ. За результатами сценарного моделювання встановлено, що середнє значення інтегрального показника впливу людського фактора на ризик ІСНЗ зростає від 0,40426 для сценарію відкритого моря – до 0,949974 для штормового аварійного режиму у вузькому каналі, а ймовірність критичного режиму досягає 1 у сценаріях обмеженої видимості та штормового аварійного проходу.

Здійснено завершальну експертну LOG-валідацію розроблених моделей і методів. Із понад 300 тренажерних траєкторій відібрано 78 LOG-проходів з ознаками людського фактора. Виконана експериментальна перевірка підтвердила коректність запропонованих науково-методологічних положень та їхню придатність до використання в системах навігаційного забезпечення, підтримки прийняття рішень, автоматизованого керування, експертного аналізу траєкторій, оцінювання ризиків людського фактора та професійної підготовки морських фахівців.

Основні практичні результати дослідження впроваджено в навчальний процес морських закладів вищої освіти, тренажерну підготовку морських фахівців, процедури аналізу AIS/ECDIS-даних, LOG-валідації, діагностики операторських станів і оцінювання ризиків людського фактора. Отримані результати можуть бути використані для створення інтелектуальних ергатичних систем навігаційного забезпечення, систем підтримки прийняття рішень, засобів експертного контролю траєкторій, адаптивного управління ризиками та підвищення безпеки процесів навігації й управління рухом судна.

Ключові слова: ергатична система, людино-машинна система, навігаційне забезпечення, управління рухом, безпека судноводіння, людський фактор, оператор, людино-машинна взаємодія, інформаційне поле, навігаційна ситуація, ситуаційна обізнаність, AIS, ECDIS, інтелектуальна обробка навігаційної інформації, автоматизоване керування, інтелектуальне управління, адаптивне управління, система підтримки прийняття рішень, інтелектуальна підтримка, моделювання прийняття рішень, прийняття рішень в умовах невизначеності, прогнозування дій оператора, когнітивний стан оператора, функціональний стан оператора, інформаційне навантаження, навігаційний ризик, ризик людського фактора, оцінювання ризику, моніторинг, безпечне маневрування судна, траєкторія руху судна, параметри руху, ризик зіткнення суден, попередження небезпечних ситуацій, автоматизація судноводіння, фрактально-епізодний аналіз, траєкторна мікроваріативність, дисторсія

часу, системний аналіз, математичне моделювання, ситуаційне моделювання, імітаційне моделювання, інтелектуальні системи навігаційного забезпечення.

ANNOTATION

Nosov P.S. Scientific and Methodological Foundations for the Control of Ergatic Systems of Navigation Support. – Qualifying scientific work as a manuscript.

Dissertation for obtaining the scientific degree of Doctor of Technical Sciences in specialty 05.22.13 – Navigation and Traffic Control. – National University «Odesa Maritime Academy», Odesa, 2026.

The dissertation scientifically substantiates and proves the solution of an urgent scientific and technical problem of improving maritime safety, which is carried out through the development of scientific and methodological foundations for managing ergatic systems of navigation support, taking into account the human factor as an internal functional parameter of the information-control system of ship motion.

Based on the results of the analysis of the subject area, an urgent scientific and technical problem has been formulated, which consists in the need to improve the safety, stability and efficiency of ship motion control under conditions of intensification of shipping, increasing information load on the operator, complication of the navigational situation and the spread of automated means of navigation support.

A systemic contradiction has been identified between the need to increase the reliability, responsiveness and adaptability of navigation support processes, on the one hand, and the insufficient formalization of the operator's cognitive, temporal-behavioral and psychophysiological characteristics in existing models of ship motion control, on the other hand. In most modern approaches, the human factor is considered mainly as an external source of errors or an operational limitation, whereas under real conditions of ship motion control it is an internal parameter of the ergatic system that affects the perception of the navigational situation, timeliness of reactions, choice of control actions and risk level.

Based on the analysis of marine vessel accidents, the development of the e-Navigation concept, modern AIS/ECDIS, RADAR/ARPA, VTS, GNSS, decision support systems and automated control means, it has been established that further improvement of maritime safety requires a transition from technocentric improvement of individual navigation means to the management of the information system of navigation support as an integral ergatic scheme «operator – information – risk – decision – control mode». It has been proved that the effectiveness of functioning of ergatic systems of navigation support is determined not only by the quality of technical means or automation algorithms, but by the coherence of the operator's information field, his functional state, parameters of the navigational environment, regulatory restrictions, human-factor risks and ship motion control modes.

A comprehensive approach to managing ergatic systems of navigation support has been proposed, which is based on the combination of methods of intelligent AIS/ECDIS data processing, fractal-episodic trajectory analysis, formalization of the operator's cognitive and temporal-behavioral states, assessment of human-factor risks, expert LOG validation and adaptive decision support in the processes of ship motion control.

A conceptual and structural model of the operator's information field in ergatic systems of navigation support has been developed. The model combines the external navigational environment, technical information flows of ECDIS, AIS, RADAR/ARPA, GNSS, VTS,

meteorological data, COLREG requirements, Bridge SOP, port and company procedures, operator states, control modes and safety results. This makes it possible to represent the process of ship motion control as the interaction of information, decision, risk and control mode in a unified functional structure.

An analog-indicator model of stability and controlled dynamics of the ergatic system of navigation support based on a gravitational-inertial interpretation has been developed. The proposed model makes it possible to formalize the stability margin, functional reserve, influence of external and internal disturbances, conditions of transition to a strained or critical mode and the role of the human factor in changing the limits of controllability of the ISNS.

A formalized fractal-episodic method of intelligent processing of AIS/ECDIS trajectories has been developed, intended for identifying vessel micromovements, local deviations, course microcorrections and trajectory indicators of the operator's control activity. The method combines metric normalization of navigational data, calculation of kinematic features, fractal estimation in sliding windows, identification of microvariability episodes, their fractal coding, assessment of episodic risk and robust quality control. This ensures the formation of reproducible maneuvering profiles and quantitative assessment of trajectory microvariability as an indicator of the influence of the human factor on ship motion safety.

The conceptual foundations for constructing an intelligent technology of navigational information processing have been further developed, according to which AIS/ECDIS data are transformed into a formalized feature space of operator behavior, suitable for analyzing course microcorrections, local deviations from the route line, variability of maneuvering parameters, risk-oriented statistical interpretation and prediction of operator actions.

A formal-geometric model of operator attention distribution has been developed, which makes it possible to describe the limited attention resource as a metrized space of its distribution among functionally significant objects of the information field. The model provides formalization of attention redistribution mechanisms, determination of conditions of incomplete coverage of the navigational situation and identification of prerequisites for erroneous actions in the ergatic control scheme.

Models for identifying subjective time distortion, cognitive, temporal-behavioral and psychophysiological states of the operator have been developed. The proposed models make it possible to quantitatively interpret operator states through temporal, behavioral, navigational, psychodiagnostic and contextual indicators, relate them to the characteristics of the navigational situation and use them for diagnostics, prediction and decision support.

Models and methods for managing human-factor risks in ergatic systems of navigation support have been developed further. Within the proposed approach, risk is considered as a controlled object, for which signs of a dangerous operator state, risk level, response rule and form of corrective, supportive or training influence are determined. On this basis, an integrated scheme has been substantiated: data on the environment and operator – signs of state and behavior – identification of risk level – control response rule – corrective or recommendation intervention. In order to improve the efficiency of automated ship motion control, models, mechanisms and tools have been developed and experimentally verified, covering the local level of optimal control of actuating devices, multi-target maneuvering, storm control, routing according to a risk criterion and hardware-software tools for diagnosing the spatial-temporal structure of operator attention. This confirmed the possibility of practical consideration of the human factor in the tasks of decision support, automated control and analysis of ship motion

safety.

Experimental verification of the proposed models and methods has been carried out on AIS/ECDIS data, simulator scenarios, LOG files, operator and trajectory indicators. Fractal-episodic analysis was verified on an array of 8684 AIS/ECDIS passages; operator-temporal identification – on data from 76 navigators; the integral indicator $I_{HF \rightarrow R}$ – in six scenarios of ISNS functioning. According to the results of scenario modeling, it was established that the average value of the integral indicator of the influence of the human factor on ISNS risk increases from 0.40426 for the open sea scenario to 0.949974 for the storm emergency mode in a narrow channel, and the probability of a critical mode reaches 1 in the scenarios of restricted visibility and storm emergency passage.

The final expert LOG validation of the developed models and methods has been carried out. From more than 300 simulator trajectories, 78 LOG passages with signs of the human factor were selected. The performed experimental verification confirmed the correctness of the proposed scientific and methodological provisions and their suitability for use in systems of navigation support, decision support, automated control, expert trajectory analysis, assessment of human-factor risks and professional training of maritime specialists.

The main practical results of the research have been implemented in the educational process of maritime higher education institutions, simulator training of maritime specialists, procedures for AIS/ECDIS data analysis, LOG validation, diagnostics of operator states and assessment of human-factor risks. The obtained results can be used for creating intelligent ergatic systems of navigation support, decision support systems, tools for expert trajectory control, adaptive risk management and improving the safety of navigation and ship motion control processes.

Keywords: ergatic system, human–machine system, navigational support, ship motion control, navigation safety, human factor, operator, human–machine interaction, information field, navigational situation, situational awareness, AIS, ECDIS, intelligent processing of navigational information, automated control, intelligent control, adaptive control, decision support system, intelligent decision support, decision-making modelling, decision-making under uncertainty, operator action prediction, operator cognitive state, operator functional state, information workload, navigational risk, human-factor risk, risk assessment, monitoring, safe ship manoeuvring, ship trajectory, motion parameters, ship collision risk, hazardous situation prevention, ship navigation automation, fractal-episode analysis, trajectory microvariability, time distortion, systems analysis, mathematical modelling, situational modelling, simulation modelling, intelligent navigational support systems.

Підп. до друку 15.09.2026.
Формат 60×84/16. Папір офсет.
Гарнітура Times New Roman. Ум. друк. арк. 2,79.
Тираж 100 пр. Зам. № И26-09-26 Національний
університет «Одеська морська академія»
65029, м. Одеса, Дідріхсона, 8.
Тел./факс (0482) 34-14-12
publish-r@onma.edu.ua
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
ДК № 1292 від 20.03.2003